



Contribution à l'étude d'antennes discrètes pour porteurs métalliques. Application à l'automobile du concept "Car-antenna"

Demba D. Niang

► To cite this version:

Demba D. Niang. Contribution à l'étude d'antennes discrètes pour porteurs métalliques. Application à l'automobile du concept "Car-antenna". Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Rennes 1, 2010. Français. NNT: . tel-00564618

HAL Id: tel-00564618

<https://theses.hal.science/tel-00564618>

Submitted on 9 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1
sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne

pour le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1
Mention : Traitement du signal et Télécommunications
Ecole doctorale Matisse

présentée par
Demba NIAN

préparée à l'unité de recherche (n° 6164 IETR)
Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes
Structure et Propriété de la Matière

**Contribution à l'étude
d'antennes discrètes pour
porteurs métalliques.
Application à
l'automobile du concept
"Car-antenna".**

**Soutenue à Rennes
le 05 Novembre 2010**

devant le jury composé de :

Marc HEDDEBAUT

Directeur de recherches INRETS, Lille / rapporteur

Robert STARAJ

Professeur des Universités, Université de Nice-Sophia
Antipolis - LEAT / rapporteur

Eric GIMET

Ingénieur de Recherches - PSA Peugeot Citroën, Vé-
lizy / examinateur

Cyrille LE MEINS

Ingénieur Thales / examinateur

Mohamed HIMDI

Professeur des Universités, Université de Rennes 1 -
IETR / directeur de thèse

Franck COLOMBEL

Maître de Conférence-HDR, Université de Rennes 1
- IETR / co-directeur de thèse

Résumé:

Les travaux présentés dans cette thèse concernent une étude d'antennes large bande pour application automobile.

L'objectif est de proposer des antennes discrètes et efficaces. Pour cela, après une étude d'antériorité, notre choix s'est porté sur le concept car-antenna qui consiste à utiliser la structure du véhicule comme élément rayonnant.

Dans un premier temps, ce principe est appliqué à des structures métalliques simples telles qu'un parallélépipède ou une représentation simplifiée d'un véhicule de type Citroën C2 à l'échelle 1/2 avant d'être appliqué à des véhicules réels principalement dans la bande FM. Les impédances ainsi que les diagrammes de rayonnement théoriques et mesurés des structures ont montré qu'une amplification raisonnable du car-antenna permet d'approcher les performances de l'antenne fouet FM de référence.

Nous avons observé que le diagramme de rayonnement du car-antenna s'oriente en fonction de la localisation du point excitateur. Dans la dernière partie, cette propriété est exploitée pour faire de la diversité de diagramme. Les calculs et les mesures faits dans ce sens ont montré que grâce à cette méthode, le besoin de l'amplification peut être largement revu à la baisse.

Mots clés : Antennes (électronique), Automobile, Electromagnétisme, Systèmes de télécommunications à large bande.

Abstract :

The presented work in this PhD Thesis is a contribution done in wide band antenna especially in the automotive domain.

The main goal is to propose efficient and discrete antennas. So, a study is done on the existent antennas in this domain. This permits us to reorient our work to the new concept of "car-antenna". It consists to use the metallic structure of a vehicle as a radiated element.

At first, the principle is tested on simple structures like parallelepiped or a simplified representation of a vehicle with a size scaled $\frac{1}{2}$ before applying it on the real vehicle like the Citroën C2 on the FM band. The impedances and the radiated diagrams calculated and measured show that a reasonable amplification of the car-antenna can permit to approach the referent whip antenna.

We denote too the radiated diagram is oriented by the localization of the exciter. In the last part, this property is exploited to do a diversity of diagram. The calculation and the measurements let us see that with this method, the amplifier gain can be considerably decreased.

Title: Contribution on the discreet antenna study on metallic carrier. Automotive application of the "Car-antenna" concept.

Table des matières

Table des matières	1
Table des figures	5
1 Introduction Générale	15
1.1 Contexte et motivations de l'étude	15
1.2 Objectifs et contributions	16
1.3 Organisation du document	17
2 Etat de l'art	19
2.1 Introduction	19
2.2 Antennes couramment utilisées dans le domaine de l'automobile . . .	20
2.2.1 Les antennes fouet	20
2.2.2 Les antennes bobines pour application <i>AM</i>	21
2.2.3 Les antennes fractales	22
2.2.4 Les antennes patch	24
2.2.5 Les antennes sérigraphiées	25
2.2.6 Les antennes transparentes	28
2.2.7 Les antennes GSM	29
2.2.8 Les antennes pour communications satellitaires (radio-numérique, GPS,...)	31
2.2.9 Les antennes pour communications inter-véhicule	36
2.2.10 Les antennes pour Radar anticollision	37
2.2.11 Autres types d'antenne	39
2.3 Technologies d'antennes émergentes pour l'automobile	42
2.4 Effet du véhicule sur les performances des antennes	43
2.5 Le concept car-antenna	45
2.5.1 Cas d'une excitation par une antenne secondaire	45
2.5.2 Cas d'une excitation du véhicule par un câble coaxial	47
2.5.3 Cas d'une utilisation des ouvertures existantes pour réaliser des antennes fentes	49
2.6 Bilan	50

3	Etude du comportement radioélectrique de structures métalliques simples	51
3.1	Introduction	51
3.2	Tests préliminaires : Mise en évidence du rayonnement de la structure du véhicule	51
3.3	Application du concept car-antenna à des formes canoniques (théorie et mesure)	55
3.3.1	Introduction	55
3.3.2	Outils de simulation	55
3.3.3	Examen de la répartition des courants surfaciques du parallélépipède illuminé par une onde plane	56
3.3.4	Examen de la répartition des courants surfaciques d'un véhicule à dimensions réduites illuminé par une onde plane	59
3.3.5	Détermination des diagrammes de rayonnement et des impédances d'entrée pour différents points d'excitation	64
3.3.6	Mesure des diagrammes de rayonnement et d'impédances d'entrée	72
3.4	Bilan de l'étude des véhicules à taille réduite	76
4	Etude du concept car-antenna sur un véhicule de taille réelle	79
4.1	Introduction	79
4.2	Examen de la répartition des courants sur le véhicule illuminé par une onde plane	80
4.2.1	Illumination de la Citroën C2 par une onde plane	80
4.2.2	Bilan	84
4.3	Détermination des diagrammes de rayonnement et des impédances d'entrée pour quelques points d'excitation dans la bande FM	84
4.3.1	Les diagrammes de rayonnement théoriques	85
4.3.2	Les diagrammes de rayonnement expérimentaux	87
4.3.3	Présentation des impédances d'entrée	99
4.3.4	Récapitulation	101
4.4	Mesure des niveaux reçus en bande FM	102
4.4.1	Mesure en statique sur une Citroën C4	102
4.4.2	Mesure en roulage sur une Citroën C2	103
4.5	Bilan	110
5	Etude de la propriété multi-diagramme du car-antenna : Diversité de diagrammes	113
5.1	Introduction	113
5.2	Présentation du principe de la diversité	114
5.3	Quelques résultats théoriques sur la diversité de diagrammes appliquée à des structures canoniques	115
5.3.1	Sélection d'un signal parmi plusieurs provenant des différents points d'excitation	115

5.3.2	Amélioration du dispositif : Pondération de chaque diagramme en amplitude	118
5.4	Etude expérimentale de la diversité en roulage : Enregistrement du spectre FM	122
5.4.1	Description et objectifs	122
5.4.2	Présentation et interprétation des résultats	122
5.5	Bilan	128
6	Conclusions et perspectives	129
Annexes		133
A	Distribution des courants suite à une illumination du mini-car par une onde plane en espace libre	135
A.1	Illumination du mini-car à 630MHz	135
A.2	Illumination du mini-car à 866MHz	137
A.3	Illumination du mini-car à 3.15GHz	138
B	Distribution des courants suite à une illumination du mini-car par une onde plane en présence d'un plan de sol réel	141
B.1	Illumination du mini-car à 630MHz	141
B.2	Illumination du mini-car à 866MHz	143
B.3	Illumination du mini-car à 3.15GHz	144
C	Distribution des courants suite à une illumination du mini-car par une onde plane en espace libre	147
C.1	Mesure du diagramme de rayonnement au point d'excitation P5 . . .	147
C.2	Mesure du diagramme de rayonnement au point d'excitation P6 . . .	148
C.3	Mesure du diagramme de rayonnement au point d'excitation P7 . . .	149
Bibliographie		151

Table des figures

1.1	Applications radiofréquences utilisées dans un véhicule	15
2.1	Antenne multi-fonctions (FM et PCS) à accès unique pour application automobile	21
2.2	Diagrammes de rayonnement mesurés en azimut : FM et PCS	21
2.3	Antenne boucle fonctionnant en AM	22
2.4	Evolution de la fréquence de résonance d'une antenne dipôle en fonction du nombre d'itérations	23
2.5	Antenne fractale insérée dans un pare brise	23
2.6	Antenne patch suspendue dans l'air alimentée à l'aide d'une ligne coplanaire à 77GHz (Application au Radar anti-collision)	24
2.7	Antenne sérigraphiée sur vitre	25
2.8	Utilisation d'un ampli pour une antenne active AM/FM (ampli placé sous le tableau de bord)	26
2.9	ROS de l'antenne active FM présentée sur la figure 2.8	27
2.10	Configuration de l'antenne avec son circuit d'adaptation à éléments passifs	27
2.11	Amélioration des performances d'une antenne sérigraphiée en AM grâce à l'utilisation des vitres latérales et du réseau de dégivrage	28
2.12	Exemple de réalisation d'une antenne transparente	29
2.13	Géométrie de l'antenne proposée avec un plan de coupe vertical . . .	30
2.14	Diagramme de rayonnement en azimut mesuré à 900MHz pour les composantes E_θ et E_ϕ	30
2.15	Diagramme de rayonnement requis pour la radio numérique pour deux types de satellite (XM et SIRIUS)	31
2.16	Plan de masse circulaire avec son antenne sous test en son centre . .	32
2.17	Diagrammes de rayonnement pour les différentes configurations . . .	32
2.18	Modification des arrêtes du plan de masse circulaire de l'antenne de réception de radio numérique par satellite	33
2.19	Diagramme de rayonnement obtenu avec un plan de masse modifié (ajout de la "jupette")	33
2.20	Diagrammes de rayonnement pour une antenne hélice (réception signaux SDAR) au centre du toit d'un véhicule	34
2.21	Position des antennes sur le toit d'un véhicule	34

2.22	Caractéristiques idéales du diagramme de l'antenne en GPS au dessus du toit du véhicule en mouvement	35
2.23	Exemples d'orientation de diagrammes dans une communication de type C2C	36
2.24	Antenne au dessus du véhicule à l'échelle $\frac{1}{2}$ et répartition de courant correspondante à 5.8GHz	37
2.25	Variation du gain en fonction de l'angle θ obtenu avec l'antenne présentée dans la figure 2.24 (vue de côté)	37
2.26	Gabarit des diagrammes de rayonnement requis pour une communication Radar anticollision	38
2.27	Lentille sphérique en téflon utilisée pour la focalisation du faisceau	38
2.28	Présentation de l'antenne placée sur le toit du véhicule	39
2.29	Illustration de la problématique de l'alimentation dans l'installation de l'antenne	40
2.30	Antenne spirale placée sur la lunette arrière d'un véhicule : illustration de la dégradation de l'impact visuel	41
2.31	Antenne spirale placée sur le toit d'un véhicule : illustration de l'encombrement	41
2.32	Coefficient de réflexion de l'antenne pour les signaux terrestres et satellitaires ainsi que le couplage entre les deux accès	42
2.33	Vue de dessus du réseau d'antennes réalisé par C. Caloz et al.	43
2.34	Comparaison des S_{11} pour différentes natures de dépôt recouvrant une antenne GPS sur la carrosserie d'un véhicule	44
2.35	Diagramme de rayonnement de la composante principale d'une antenne GPS recouverte de différents revêtements (cuivre, peinture métallisée,...) comparé à une référence	45
2.36	Antenne excitatrice de type disc-cône placée en dessous d'un véhicule	46
2.37	ROS du car-antenna excité par une antenne de type disc-cône	46
2.38	Identification des boucles électriques	47
2.39	Configuration du système antennaire avec le câble coaxial ainsi que le point spécifique d'accès	48
2.40	Modification du câble d'alimentation	48
2.41	Cellule d'adaptation d'impédance utilisée pour améliorer la réception en FM	49
2.42	Représentation de l'antenne fente utilisant la porte et le reste d'un véhicule	49
3.1	Spectre des signaux AM suite à un accrochage de l'âme d'un câble coaxial sur le siège arrière d'une Citroën Xsara Picasso (a) et localisation du point d'accrochage (b)	52
3.2	Spectre des signaux DVB-H (a) et DCS (b) suite à un accrochage de l'âme d'un câble coaxial sur le support de la roue de secours d'une Ford Mondeo et localisation du point d'accrochage (c)	53

3.3	Représentation du nombre de satellites GPS reçus en statique (a) et en mobilité (b) suite à un accrochage de l'âme d'un câble coaxial sur le support du siège arrière d'une Ford Mondeo et localisation du point d'accrochage (c)	53
3.4	Exemple de réalisation de bobines d'arrêt pour empêcher le passage des courants HF sur la gaine du câble coaxial : cas d'un bobinage (a) et de l'utilisation de la technologie microruban (b)	54
3.5	Dimensions du parallélépipède devant être illuminé par les ondes planes	56
3.6	Rappel du repère utilisé	57
3.7	Répartition des courants surfaciques sur la face du parallélépipède illuminé par une onde plane venant de l'avant (vue de face ; $\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$)	57
3.8	Répartition des courants surfaciques sur la face du parallélépipède illuminé par une onde plane venant du côté (vue de face ; $\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$)	58
3.9	Répartition des composantes (I_x , I_y , I_z) de courant surfacique du parallélépipède illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) ; vue de face ($\theta=90^\circ$ et $\phi=-90^\circ$)	58
3.10	Dimensions du véhicule voisines de celles d'une C2 à l'échelle $\frac{1}{2}$; (a) : vue de côté, (b) : vue de l'avant, (c) : vue de dessus et (d) : vue de profil	59
3.11	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	60
3.12	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; $\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$) . .	60
3.13	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car avec ouvertures illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessus ; $\theta=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$) .	61
3.14	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car avec ouvertures illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessus ; $\theta=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$)	61
3.15	Vue de dessous du mini-car et les zones où le courant varie peu suite à l'illumination par une onde plane venant de l'avant ou de l'arrière du mini-car	62
3.16	Vue de dessous du mini-car et les zones où le courant varie peu suite à l'illumination par une onde plane venant de l'un des côtés du mini-car	63
3.17	Vue de dessous du mini-car et zones pour lesquelles la variation du courant est favorable pour devenir une zone d'excitation du mini-car à 200MHz	63
3.18	Diagramme de rayonnement (E_θ) théorique normalisé à $\theta = 90^\circ$ du parallélépipède à 2GHz ; Branchement au point P1 ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$) pour une vue de dessous	65

3.19	Vue de dessous du parallélépipède avec la position du point d'accès et des secteurs angulaires où le diagramme présente des variations remarquables de son niveau	65
3.20	Diagramme de rayonnement (E_θ) théorique normalisé à $\theta = 90^\circ$ du parallélépipède à 2GHz ; Branchement au point $P2$ ($x = 131.5mm$; $y = 56.25mm$) ; vue de dessous	66
3.21	Schéma du parallélépipède avec les ouvertures	67
3.22	Comparaison des diagrammes de rayonnement (E_θ) théoriques normalisés à $\theta = 90^\circ$ des parallélépipèdes ouvert et fermé pour un point d'excitation $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$)	67
3.23	Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisé par rapport au gain max à $\theta = 90^\circ$ du mini-car à 200MHz ; Branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) ; vue de dessous	68
3.24	Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisé à $\theta = 90^\circ$ du mini-car fermé à 200MHz ; Branchement au point $P2$ ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$) ; vue de dessous	68
3.25	Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisé à $\theta = 90^\circ$ du mini-car avec des ouvertures à 200MHz ; Branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) ; vue de dessous	69
3.26	Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisée à $\theta = 90^\circ$ du mini-car avec des ouvertures à 200MHz ; Branchement au point $P2$ ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$) ; vue de dessous	69
3.27	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion du parallélépipède dans la bande [1.9GHz-2.1GHz] ; branchement au point $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$)	70
3.28	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion du mini-car fermé dans la bande [150MHz-250MHz] ; branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$)	71
3.29	Schéma représentatif du circuit d'adaptation utilisé pour optimiser l'impédance du mini-car	71
3.30	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion du mini-car fermé théoriques après la cellule d'adaptation dans la bande [150MHz-250MHz] ; branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$)	72
3.31	Comparaison des diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés théoriques et mesurés en azimut ($\theta = 90^\circ$) du parallélépipède à 2GHz ; excitation au point $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 56.25mm$)	73
3.32	Diagramme de rayonnement (E_θ) mesuré en azimut du mini-car avec ouvertures à la base de mesure de TDF à 200MHz	73
3.33	Comparaison du diagramme de rayonnement (E_θ) théorique du micro-car à celui mesuré en azimut dans le plan $\theta = 90^\circ$ à 200MHz	74
3.34	Impédance mesurée du mini-car muni d'ouvertures en présence d'un plan de sol réel sur la bande [150MHz-250MHz]	75

3.35	Transformateur d'impédance utilisé pour l'adaptation du mini-car dans la bande [150MHz-250MHz]	75
3.36	Comparaison des impédances simulée et mesurée du mini-car la bande [150MHz-250MHz] après insertion d'une cellule d'adaptation	76
4.1	Rappel du repère utilisé	80
4.2	Cartographie des courants induits par l'illumination de la C2 par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$; $\phi=180^\circ$) du véhicule à 100MHz (vue de face; $\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$)	81
4.3	Cartographie des courants induits par l'illumination de la C2 par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$; $\phi=0^\circ$) du véhicule à 100MHz (vue de face; $\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$)	82
4.4	Cartographie des courants sur une C2 illuminée par une onde plane venant du côté ($\theta=90^\circ$; $\phi=90^\circ$) à 100MHz	82
4.5	Vue de dessous du véhicule et les zones où le courant varie peu suite à l'illumination du véhicule par une onde plane	83
4.6	Vue de dessous du véhicule avec les zones pour lesquelles les courants varient peu dans la bande FM	84
4.7	Diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé théorique en azimut ($\theta=90^\circ$) de l'antenne fouet au dessus du toit d'une C2 à 100MHz	85
4.8	Diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé théorique en azimut ($\theta=90^\circ$) du concept car-antenna appliqué à une C2 au point P1 ($x = 471mm$; $y = 384mm$) pour une vue de dessous de la C2 à 100MHz	86
4.9	Diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé théorique en azimut ($\theta=90^\circ$) du concept car-antenna appliqué à une C2 au point P2 ($x = 400mm$; $y = 84mm$) pour une vue de dessous de la C2 à 100MHz	86
4.10	Antenne fouet FM placée sur le toit d'une C2 (véhicule sous test-VST) et repère utilisé pour l'expérimentation	87
4.11	Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés en azimut ($\theta=90^\circ$) de l'antenne fouet FM en polarisation verticale sur le site de Nanterre pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz	88
4.12	Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés en azimut ($\theta=90^\circ$) du car-antenna pour un branchement sur le pot d'échappement pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz	88
4.13	Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés en azimut ($\theta=90^\circ$) pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz; branchement sur la glissière	89
4.14	Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés du car-antenna en azimut ($\theta=90^\circ$) pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz; branchement sur la boucle d'attache de la ceinture de sécurité	90
4.15	Photo de l'arche en présence d'une voiture sous test	91
4.16	Illustration du repère utilisé par l'arche dans la caractérisation d'antennes (θ, ρ, ϕ sont les coordonnées du repère sphérique)	91
4.17	Photo du branchement du câble coaxial au niveau du levier de frein à main	92

4.18	Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P1$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	93
4.19	Branchement au niveau de la ceinture de sécurité arrière droit ($P2$) .	93
4.20	Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P2$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	94
4.21	Branchement au niveau de la ceinture de sécurité arrière gauche ($P3$)	94
4.22	Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P3$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	95
4.23	Mise en évidence du branchement ($P4$)	95
4.24	Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P4$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	96
4.25	Antenne fouet FM au dessus du toit de la ($C2$)	96
4.26	Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux correspondants de l'antenne fouet au dessus de la $C2$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	97
4.27	Photo du branchement au point $P1$ et du diagramme de rayonnement (E_θ) associé en azimut à 100MHz	98
4.28	Photo du branchement au point $P6$ et du diagramme de rayonnement (E_θ) associé en azimut à 100MHz	99
4.29	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion théoriques de l'antenne fouet au dessus d'une $C2$ dans la bande [85MHz-110MHz] .	100
4.30	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion théoriques du concept car-antenna appliqué à une $C2$ dans la bande [85MHz-110MHz]	100
4.31	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion mesurées de la $C2$ au point $P4$ dans la bande [85MHz-110MHz]	101
4.32	Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion mesurées d'un véhicule Peugeot 407 dans la bande [85MHz-110MHz]	101
4.33	Comparaison des niveaux de réception du concept car-antenna avec ceux du système antenne de référence sur une Citroën $C4$ coupé dans la bande [87MHz-108MHz]	102
4.34	Itinéraire du parcours effectué lors de l'acquisition (Image GoogleEarth)	104
4.35	Enregistrement des spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 10h15min47s (48°45'59.196"N ; 2°12'58.008"E)	105
4.36	Enregistrement des spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 10h16min01s (48°45'59.202"N ; 2°12'58.008"E)	105
4.37	Enregistrement des spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 10h24min16s (48°45'37.188"N ; 2°12'05.208"E)	106
4.38	Spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 87MHz pour 220 enregistrements	106

4.39	Spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 100MHz pour 220 enregistrements	107
4.40	Spectre des deux antennes à 107MHz pour 220 enregistrements . . .	107
4.41	Ondulations des systèmes antennaires en fonction de la fréquence . .	108
4.42	Spectres du car-antenna et de l'antenne fouet pour différentes positions du véhicule sur le circuit	109
4.43	Contribution des plans de coupe du diagramme de rayonnement en fonction de la position du véhicule sur le parcours	109
5.1	Illustration de l'amélioration d'une réception par une technique de diversité d'antennes	114
5.2	Diagrammes de rayonnement (E_θ) élémentaires d'une C2 pour 2 points d'excitation différents (a) et (b) et Diagramme de rayonnement résultant de la combinaison des deux diagrammes élémentaires (c)	115
5.3	Diagrammes de rayonnement (E_θ) théoriques normalisés en azimut ($\theta=90^\circ$) du parallélépipède à 2GHz respectivement aux points P1 (a); P2 (b) et diagramme issu de la diversité (c) entre les points P1 ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$) et P2 ($x = 131.5mm$; $y = 56.25mm$); vue de dessous	116
5.4	Diagrammes de rayonnement (E_θ) théoriques normalisés en azimut ($\theta=90^\circ$) du mini-car à 200MHz respectivement aux points P1 (a); P2 (b) et diagramme issu de la diversité (c) entre les points P1 ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) et P2 ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$); vue de dessous	117
5.5	Schéma de principe illustrant le besoin de la pondération	118
5.6	Schéma de principe du fonctionnement de la diversité pondérée . . .	119
5.7	Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et mesurés en azimut aux points d'excitation P1 (a), P2 (b) et P7 (c) (mesure TDF) ainsi que celui issu de la diversité (d) pondérée appliquée à ces points à 107MHz.	120
5.8	Comparaison du diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé en azimut ($\theta=90^\circ$) de la diversité pondérée appliquée à la C2 aux points P1, P2 et P7 (mesure TDF) avec celui de l'antenne fouet FM à 107MHz . .	121
5.9	Représentation cartésienne du diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé en azimut ($\theta=90^\circ$) de la diversité pondérée appliquée à la C2 aux points P1, P2 et P7 (mesure TDF) avec celui de l'antenne fouet FM à 107MHz	121
5.10	Itinéraire du chemin parcouru lors de l'acquisition du spectre FM en mode diversité (image GoogleEarth)	122
5.11	Enregistrement de spectre du car-antenna amplifié en mode diversité et de celui du fouet sur le site de PSA-Velizy ($48^\circ 45' 59.370''N$; $2^\circ 12' 57.300''E$)	123

5.12	Enregistrement de spectre du car-antenna amplifié en mode diversité et de celui du fouet sur la descente de Bièvres ($48^{\circ}45'17.742''\text{N}$; $2^{\circ}12'53.676''\text{E}$)	123
5.13	Niveaux reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié de 6dB en mode diversité à 91MHz pour 120 enregistrements	124
5.14	Niveaux reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié de 6dB en mode diversité à 100MHz pour 120 enregistrements	125
5.15	Comparaison des spectres FM reçus sur le site de PSA-Vélizy du car-antenna simplement amplifié (6dB) et de celui en mode diversité amplifié de 6dB ($48^{\circ}45'59.370''\text{N}$; $2^{\circ}12'57.300''\text{E}$)	126
5.16	Ondulations des deux systèmes antennaires en fonction de la fréquence	126
5.17	Spectres du car-antenna en mode diversité et de l'antenne fouet pour différentes positions du véhicule sur le circuit	127
A.1	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=-90^{\circ}$) à 630MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	135
A.2	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$) à 630MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	136
A.3	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=0^{\circ}$) à 630MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	136
A.4	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=-90^{\circ}$) à 866MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	137
A.5	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$) à 866MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	137
A.6	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=0^{\circ}$) à 866MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	138
A.7	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=-90^{\circ}$) à 3150MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	138
A.8	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$) à 3150MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	139
A.9	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^{\circ}$ et $\phi=0^{\circ}$) à 3150MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^{\circ}$ et $\phi=90^{\circ}$))	139

B.1	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=-90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 630MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	141
B.2	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 630MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	142
B.3	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 630MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$)) .	142
B.4	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=-90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 866MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	143
B.5	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 866MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	143
B.6	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 866MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$)) .	144
B.7	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=-90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 3150MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	144
B.8	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 3150MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))	145
B.9	Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 3150MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$)) .	145
C.1	Photo du branchement du câble coaxial au niveau du phare avant gauche	147
C.2	Diagrammes de rayonnement normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P5$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	148
C.3	Photo du branchement du câble coaxial au niveau du coffre arrière gauche	148
C.4	Diagrammes de rayonnement normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P6$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	149
C.5	Photo du branchement du câble coaxial derrière la console auto-radio	149
C.6	Diagrammes de rayonnement normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P7$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz	150

Chapitre 1

Introduction Générale

1.1 Contexte et motivations de l'étude

Si on se place trente ans en arrière, on peut se rappeler que le seul système de communications qui équipait les véhicules était un récepteur AM muni d'une antenne bobine à ferrite. Devenu à ce jour un moyen de transport incontournable dans les pays industrialisés ou en voie d'industrialisation, le véhicule automobile n'échappe pas aux évolutions technologiques dans le domaine des systèmes de communications (figure 1.1; référence [1]). Les évolutions sont liées à l'émergence de services aussi bien en réception qu'en émission. On peut citer par exemple la réception de signaux satellitaires pour la géolocalisation (GPS), la radio numérique, la radiotéléphonie mobile terrestre (GSM), le télépéage, la radio FM, les radars anti-collision ou encore les systèmes d'ouverture de portes ou de contrôle de pression des pneumatiques [2] [3].

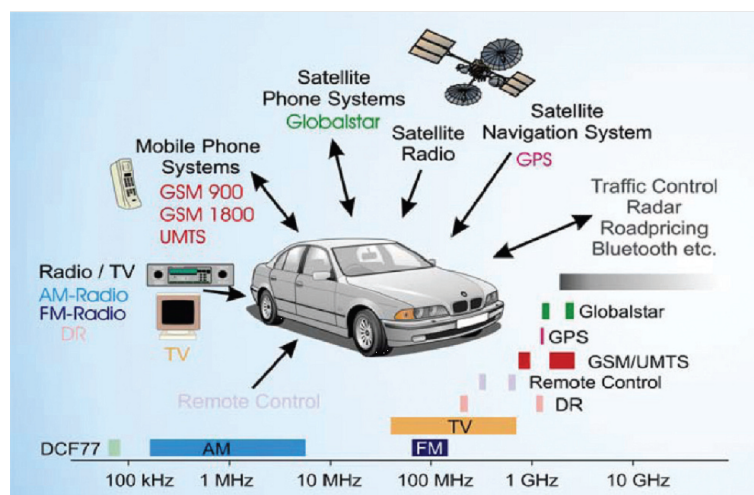


FIGURE 1.1 – Applications radiofréquences utilisées dans un véhicule

La multiplication de ces services pour l'automobile induit naturellement une augmentation du nombre d'antennes intégrées au véhicule. Ces antennes doivent bien

entendu respecter les spécifications nécessaires au bon fonctionnement des systèmes qu'elles servent tout en demeurant discrètes afin de remplir les exigences liées à la lutte contre le vandalisme, à l'amélioration de l'aéroacoustique ou même aux aspects esthétiques. D'un point de vue purement radioélectrique et face à la multiplication des aériens, les emplacements doivent être étudiés de manière à éviter ou à minimiser les couplages entre antennes [4].

Quelques années en arrière, les antennes destinées aux véhicules étaient conçues sans prendre en compte les effets de la structure métallique du véhicule sur les performances de l'antenne. Les constructeurs automobiles, faisant face à l'augmentation des services et aux espaces réduits dédiés à la localisation des antennes ont alors demandé que ces dernières soient conçues en tenant compte du véhicule.

1.2 Objectifs et contributions

Les travaux présentés dans cette thèse ont pour objectif de concevoir un système antennaire très discret fonctionnant en bande FM pour les véhicules automobiles.

Actuellement, il existe de nombreuses solutions telles que les antennes fouet, les antennes fractales, ou bien les antennes sérigraphiées. De nombreux points critiques existent pour ces systèmes et on peut en rappeler quelques uns :

- Mauvais aérodynamisme pour l'antenne fouet pouvant induire des vibrations désagréables pour le confort des passagers d'un véhicule.
- Exposition au vandalisme pour l'antenne fouet.
- Performances radioélectriques assez pauvres des antennes sérigraphiées associées à une difficulté à les maintenir en cas de défaillance.

C'est dans ce contexte que PSA Peugeot Citroën et l'Université de Rennes 1 se sont associés afin de résoudre au mieux ces problèmes.

Plutôt que de rester sur des axes largement explorés comme la miniaturisation d'antennes ou l'interaction entre le véhicule et les aériens, nous nous sommes dirigés vers un axe de recherche original et simple.

L'idée de base consiste à utiliser la structure métallique du véhicule en tant qu'élément rayonnant. Compte tenu de ses grandes dimensions elle vise à remplacer l'antenne fouet traditionnelle par la structure métallique du véhicule. C'est ce que nous appelons le concept car-antenna.

Cette contribution a démarré par une étude académique sur des parallélépipèdes métalliques ou sur un véhicule simplifié de dimensions réduites. Ceci nous a permis de mieux comprendre les mécanismes de rayonnement de ces structures métalliques.

Puis nous avons profité de cette compréhension pour l'appliquer à des véhicules réels. Les performances ont été évaluées en rayonnement mais également de manière plus quantitative en examinant les spectres reçus par le car-antenna en roulage.

1.3 Organisation du document

Ce mémoire s'articule en quatre parties :

- Dans le premier chapitre, on passe en revue de la manière la plus exhaustive possible les différents aériens utilisés de nos jours pour les très nombreuses applications de communications intégrées à l'automobile. On évoque également quelques solutions plus originales faisant appel à des matériaux émergents. On mentionne aussi quelques éléments qui montrent l'interaction du véhicule avec ces aériens.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse et à la compréhension des propriétés de rayonnement d'objets métalliques, le dernier étant un véhicule simplifié à l'échelle $\frac{1}{2}$ (mini-car). Un effort particulier est accompli pour déterminer les zones du mini-car propices à accueillir l'excitation de la structure métallique. Les caractéristiques de rayonnement de ce mini-car sont évaluées théoriquement et expérimentalement.
- Fort des résultats précédents, le troisième chapitre est consacré à l'application du concept car-antenna à des véhicules réels. Les études sont principalement menées sur une Citroën C2. Après quelques difficiles calculs mettant en évidence la forme du diagramme de rayonnement d'une C2 en fonction du point d'excitation du véhicule, de nombreuses études expérimentales ont été menées. Les premières ont permis de mesurer les diagrammes de rayonnement d'une C2 et de montrer que les gabarits de ces diagrammes évoluaient en fonction de la localisation de l'excitation. Dans un second temps, nous avons évalué le car-antenna en procédant à la réception en temps réel des signaux en bande FM en roulage. Ceci nous a permis de comparer les performances du car-antenna au système antenne de référence actuellement utilisé (antenne fouet).
- Dans le quatrième chapitre, nous avons exploité la propriété d'évolution du gabarit des diagrammes de rayonnement en fonction de la localisation de l'excitation en faisant émerger les propriétés multi-diagrammes d'une car-antenna. Ceci a été testé en roulage sur une C2 et comparé aux performances de l'antenne fouet de référence.

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Introduction

La réception des signaux AM et FM est restée pendant de très nombreuses années, la seule application de communications sans fil dans un véhicule. Depuis les années 2000, l'évolution des systèmes de communications n'a pas épargné le domaine de l'automobile. Plusieurs applications telles que la téléphonie mobile (GSM), la radiolocalisation (GPS), les systèmes d'aide à la conduite (Radar anti-collision) se sont invitées dans un premier temps dans les véhicules haut de gamme puis maintenant dans les véhicules plus courants.

En marge de cette évolution, l'aspect esthétique prend une part de plus en plus importante dans la conception des véhicules. Alors qu'il existe de moins en moins d'espaces disponibles pour leurs implantations, les antennes doivent être de plus en plus discrètes tout en demeurant efficaces.

Les antennes utilisées aujourd'hui sur un véhicule sont, soit visibles (antenne fouet, antenne GSM), soit camouflées (antennes GPS dans le bloc rétroviseur central), soit intégrées aux parois vitrées (antenne sérigraphiée). Ces antennes ne répondent pas toujours bien aux contraintes de l'automobile (manque de discrétion et d'aéroacoustique pour l'antenne fouet, influence néfaste du véhicule sur l'antenne (GPS)). Dans le cas où les critères de discrétion de l'automobile sont assez bien respectés, les technologies choisies fournissent des performances radioélectriques souvent modestes comme par exemple les antennes sérigraphiées qui présentent beaucoup de pertes.

Fort de ce constat, depuis quelques années, les constructeurs automobiles s'orientent vers de nouveaux concepts d'antenne dans le but de diminuer leur nombre (réduction de l'impact visuel) mais également d'améliorer les performances des aériens en prenant en compte l'influence du véhicule sur les éléments rayonnants. Il s'agit par exemple d'antennes miniatures et/ou multi-bandes, d'antennes plaquées ou plus récemment d'antennes transparentes intégrées sur la partie vitrée du véhicule ... Certaines études

préconisent l'utilisation de nouveaux matériaux tels que l'ITO (Indium Tin Oxyde) ou les matériaux à haute impédance tandis que d'autres proposent l'utilisation du véhicule comme plan réflecteur ou même comme élément rayonnant.

Dans l'état de l'art que nous proposons dans la suite de ce chapitre, nous présentons, dans un premier temps, les différents types d'antenne communément utilisés dans le domaine de l'automobile. Il s'agit de l'antenne fouet, des antennes fractales, du patch tronqué, des antennes "bobines" pour l'AM, des antennes pour applications C2C (Car to Car), des antennes sérigraphiées.

En second lieu, nous présentons les différentes contributions faites dans le domaine des matériaux innovants. Il s'agit principalement des antennes à base de métamatériaux.

Enfin, nous examinons les études menées sur l'effet du véhicule sur les performances des antennes avant d'exposer les contributions proposées sur le concept de car-antenna où dans ce cas le véhicule lui-même devient la structure rayonnante.

2.2 Antennes couramment utilisées dans le domaine de l'automobile

2.2.1 Les antennes fouet

Une antenne fouet est constituée par un brin conducteur alimenté par une source. La longueur du brin détermine la bande de fréquence dans laquelle l'antenne est utilisée tandis que la position de la source dépend du type d'antenne. Typiquement, pour une antenne demi-onde, la source est située au milieu de l'antenne par contre si l'antenne possède une longueur égale au quart d'onde à la fréquence centrale, la source est située à l'une des extrémités du brin [5].

Du fait de leur facilité de réalisation et de leur bonne efficacité, ces antennes ont été les premières à être utilisées dans le domaine de l'automobile [6]. Les premières antennes étaient constituées de monopole quart d'onde (75cm à 100MHz). Par la suite des techniques de réduction de tailles ont été appliquées en particulier en associant des éléments inductifs à l'antenne. L'émergence de nouveaux services radio (GSM en particulier) ont conduit à voir ces antennes associées à des structures rayonnantes au fonctionnement multi-bandes. Dans la référence [7], une antenne opérant dans les bandes FM ([76MHz-108MHz]) et PCS ([1850MHz-1990MHz]) est proposée.

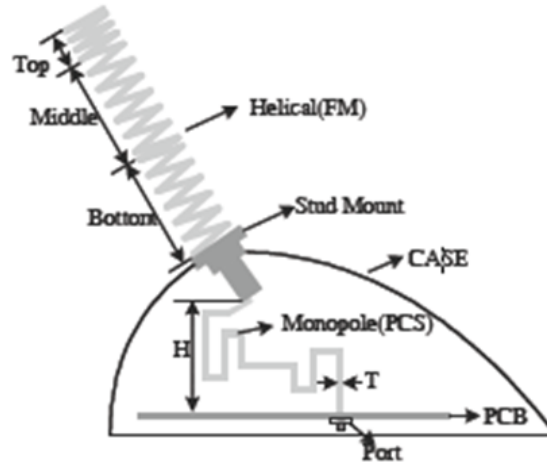


FIGURE 2.1 – Antenne multi-fonctions (FM et PCS) à accès unique pour application automobile

La figure 2.1 montre que l'antenne est constituée d'un brin en forme d'hélice (technique de réduction de taille d'une antenne fouet) et d'une ligne imprimée en méandres respectivement dédiés à la FM et à la bande PCS. Il faut souligner que l'accès pour ces deux bandes est unique. La différenciation entre les bandes de fréquence peut facilement être traitée avec un duplexeur. La figure 2.2 montre un diagramme de rayonnement expérimental quasiment omnidirectionnel en azimut aussi bien en bande FM qu'en PCS.

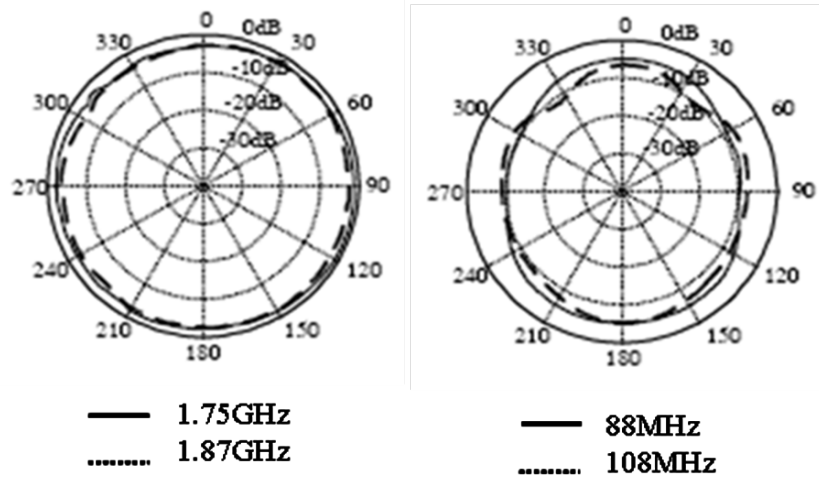


FIGURE 2.2 – Diagrammes de rayonnement mesurés en azimut : FM et PCS

2.2.2 Les antennes bobines pour application AM

Pour recevoir les émissions AM ([150kHz-281kHz] ; [520kHz-1620kHz] ; [2300kHz-26100kHz]), on utilise depuis plusieurs décennies les antennes constituées par un fil

métallique bobinée autour d'un barreau de ferrite. Ce sont des antennes compactes permettant de recevoir des signaux à très basses fréquences. Par contre, ces antenne présentent beaucoup de pertes dues à la ferrite. De ce fait, d'autres contributions tendant à palier ce problème ont été proposées. Par exemple, dans la référence [8], une antenne boucle fonctionnant dans la bande AM est présentée. Elle est constituée d'un conducteur en forme de boucle relié à un câble coaxial (20). Comme le montre la figure 2.3, une des extrémités (11) est reliée à l'âme du câble (21) tandis que l'autre (12) est reliée à la gaine (22) par l'intermédiaire d'un condensateur de faible capacité (30). Le câble utilise le véhicule (40) comme support (plan de masse).

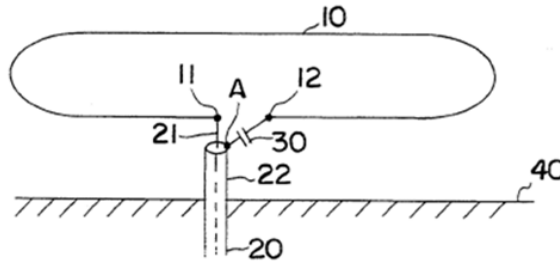


FIGURE 2.3 – Antenne boucle fonctionnant en AM

La référence [8] ne donne pas les dimensions de l'antenne mais selon elle, la boucle toute seule permet un rayonnement dans la bande FM tandis que la mise en place du condensateur autorise un rayonnement dans la bande AM. On note que plus la boucle est éloignée du plan de masse, plus l'antenne est efficace. Les performances de ce type d'antenne étant très tributaires de son emplacement sur la structure du véhicule, son utilisation est limitée surtout dans un contexte où l'espace disponible est de plus en plus rare. De plus, la fréquence de résonance de cette antenne dépend de sa géométrie. Si on applique des techniques de miniaturisation à ce type d'antenne, il est fort probable que l'efficacité et la bande passante soient dégradées.

Pour contourner ces difficultés de miniaturisation, on peut s'orienter vers les structures fractales [9] [10].

2.2.3 Les antennes fractales

Les antennes fractales sont des éléments rayonnants dont la géométrie est basée sur l'utilisation répétitive de motifs (par exemple de triangles isocèles, de rectangles ou de motifs en forme d'arbre). L'avantage de cette répétition est qu'elle permet la génération d'antennes miniatures à large bande tout en laissant inchangée l'efficacité de l'antenne. La figure 2.4 montre un exemple de miniaturisation à travers une augmentation du nombre d'itérations d'un motif.

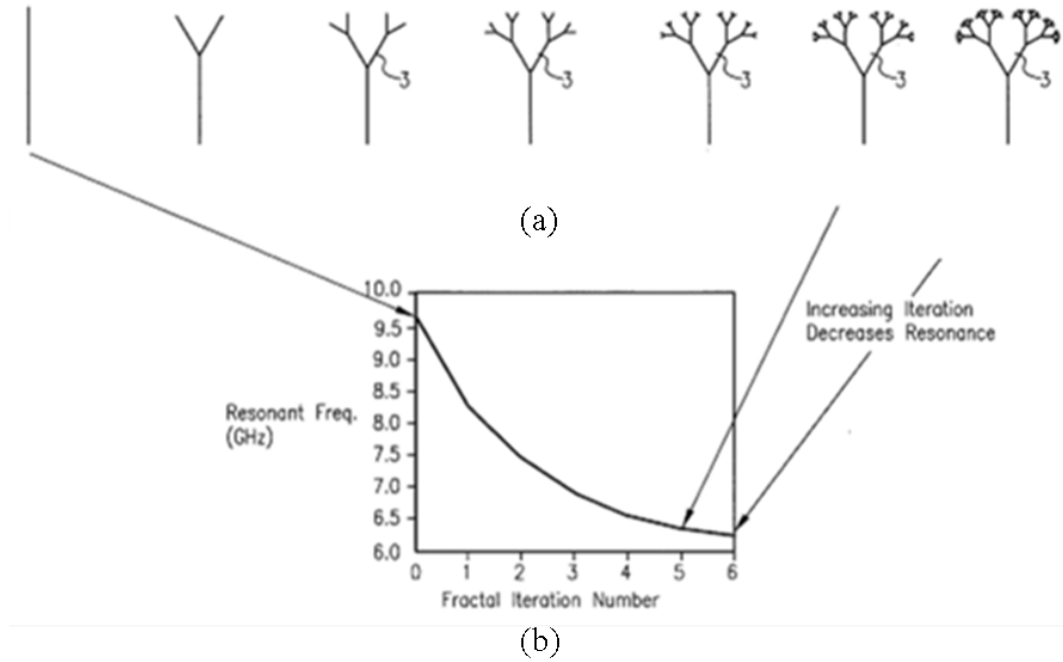


FIGURE 2.4 – Evolution de la fréquence de résonance d'une antenne dipôle en fonction du nombre d'itérations

Sur la figure 2.4(a), est représentée l'évolution itérative d'un motif d'antenne fractale. Sur la figure 2.4(b), on montre que la fréquence de résonance diminue au fur et à mesure que le nombre d'itérations augmente. La bande passante et l'efficacité de ces antennes sont inchangées lorsque l'on réduit leur fréquence de résonance (par l'augmentation du nombre d'itérations). L'antenne fractale présentée dans [11] est imprimée sur un film conducteur transparent en vue de réaliser une antenne pouvant s'insérer entre les plaques de verre d'un pare-brise. La figure 2.5 montre une coupe de l'antenne sur le pare-brise.

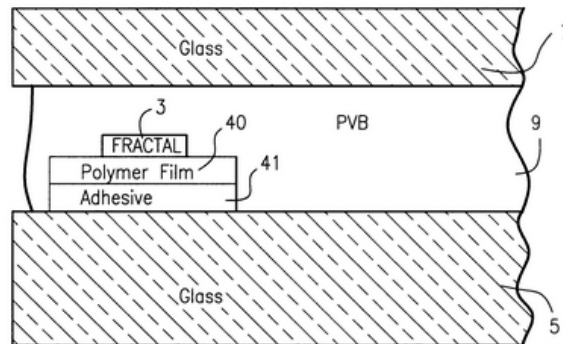


FIGURE 2.5 – Antenne fractale insérée dans un pare brise

Cette figure montre que la structure fractale (3) est gravée sur un film conducteur (40) qui à son tour est relié à la couche inférieure du pare-brise (5) grâce à un système d'adhésion (41). Plusieurs types de structure peuvent être gravés. On peut notamment mettre des motifs à base de rectangles ou de triangles isocèles ou même en forme "d'arbre" comme dans l'exemple de la figure 2.4. Il existe aussi des antennes fractales perturbées par des éléments parasites ; ceci permet de générer de nouvelles résonances et de créer des structures multi-bandes [12].

Ces antennes fractales sont certes efficaces mais très difficiles à mettre en œuvre et leur coût de réalisation peut être élevé. De plus, leur maintenance est quasi-impossible (cas de la référence [11]). C'est pour cela que d'autres solutions utilisent des technologies imprimées "classiques" mettant en œuvre des antennes patch [13].

2.2.4 Les antennes patch

Utilisées dans de nombreux secteurs industriels, les antennes patch sont également présentes dans de nombreuses applications du domaine automobile. Malgré qu'il y ait plusieurs techniques de réalisation, leur principe consiste à imprimer un motif à base d'élément conducteur sur un substrat (diélectrique). La référence [14] présente une antenne patch en technologie coplanaire opérant à 77GHz pour une application Radar automobile où l'élément rayonnant suspendu dans l'air présente une bonne efficacité. La figure 2.6 montre la structure de l'antenne.

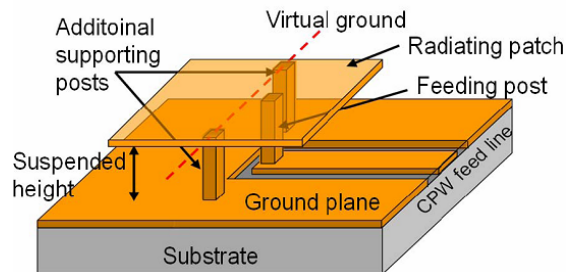


FIGURE 2.6 – Antenne patch suspendue dans l'air alimentée à l'aide d'une ligne coplanaire à 77GHz (Application au Radar anti-collision)

Les simulations montrent que plus l'élément rayonnant s'éloigne du substrat, plus le gain est important (il est de l'ordre de 10dBi pour une élévation de $200\mu m$). Les mesures quant à elles montrent 11.0% de bande passante autour de 77GHz. Pour certaines applications telles que le DAB/DMB, le GPS, le WiMAX, des antennes patch tronquées ont également été utilisées [15].

Ces antennes bien qu'efficaces sont souvent simulées, optimisées et mesurées sans tenir compte du véhicule. Ceci conduit à une détérioration de leurs performances lorsque ces antennes sont intégrées dans un véhicule. Pour palier cet inconvénient,

des antennes ont été analysées en tenant compte de l'effet du véhicule lors de la conception.

2.2.5 Les antennes sérigraphiées

Les antennes sérigraphiées sont constituées de fils conducteurs de faible épaisseur. Leurs formes sont généralement optimisées afin de faciliter leur insertion entre les différentes couches des parties vitrées d'un véhicule. L'exemple présenté sur la figure 2.7 est une illustration dans laquelle un film de cuivre est sérigraphié sur le pare-brise d'un véhicule. Le pare-brise supporte donc l'antenne tandis que la structure métallique (carrosserie du véhicule) joue un rôle de plan de masse [16].

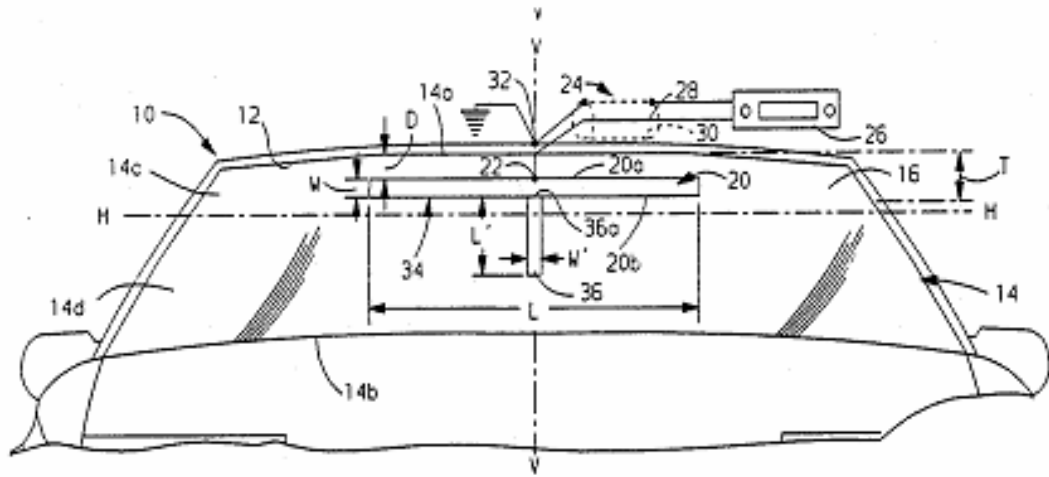


FIGURE 2.7 – Antenne sérigraphiée sur vitre

L'antenne est constituée d'un élément principal ayant une longueur L et une largeur W . Elle se situe à une distance D de la partie supérieure du véhicule (voir figure 2.7).

On note que, plus l'antenne est fine, plus la résistivité du fil sérigraphié est grande et donc moins l'antenne sera efficace (cas des matériaux organiques). En parallèle, si l'on augmente l'épaisseur de l'antenne, on diminue la résistivité mais en contrepartie on diminue la transparence de la vitre. A titre indicatif, les antennes proposées ont un pourcentage de transparence variant autour de 70%. C'est pour cela que dans la référence [16] on propose d'améliorer la discrétion d'une antenne sérigraphiée sur une vitre en plaçant l'antenne dans un endroit où elle ne gêne pas la visibilité des occupants du véhicule. Dans ce cas, on ne parle plus uniquement de transparence mais de camouflage ou d'emplacement approprié de l'antenne pour la rendre discrète.

On retrouve également dans la famille des antennes sérigraphiées, une mise en réseau de plusieurs antennes permettant d'améliorer le gain [17]. Il s'agit d'un réseau d'antennes actives utilisé pour des véhicules de type 4X4. D'autres techniques consistent à utiliser le réseau de dégivrage pour faire des antennes sérigraphiées dans la bande AM [18] ou des antennes multi-bandes (AM-FM-TV) [19]. La référence [20] propose une antenne active plaquée sur le pare-brise d'un véhicule pour une application dans les bandes AM et FM.

Cela nécessite un pare-brise long d'environ une demi-longueur d'onde permettant d'obtenir une fréquence de résonance en bande FM. La finesse du fil ainsi que le phénomène d'épaisseur de peau (environ 6μ à 100MHz pour le cuivre) font que le signal reçu demeure très faible dans les bandes AM et FM. Pour y remédier, une amplification est mise en place entre l'antenne et le récepteur radio comme le montre la figure 2.8.

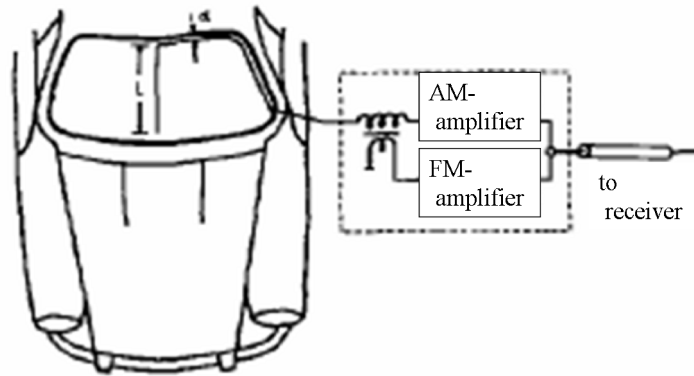


FIGURE 2.8 – Utilisation d'un ampli pour une antenne active AM/FM (ampli placé sous le tableau de bord)

Ce type d'antenne permet de remplacer l'antenne fouet sur certains modèles de véhicules haute gamme. D'autres études ont été menées dans le but de résoudre le problème d'espace disponible sur les vitres et le couplage dû aux croisements verticaux et horizontaux des fils sérigraphiés. La référence [21] est un réseau d'antennes composé de 4 éléments. Ces éléments sont de fines lignes de cuivre déposées entre les deux plaques de verre constituant la vitre.

Cette répartition des éléments constituant le réseau permet de limiter les couplages occasionnés dans le cas d'une installation classique basée sur une superposition en verticale et horizontale des éléments conducteurs. Un rapport d'onde stationnaire (ROS) de 6 est obtenu dans la bande FM comme le montre la figure 2.9.

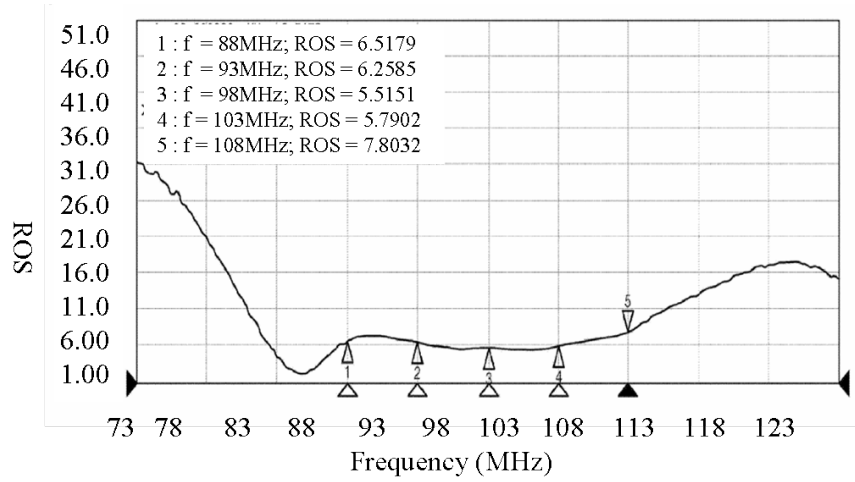


FIGURE 2.9 – ROS de l'antenne active FM présentée sur la figure 2.8

Même si le ROS dans la bande FM est de l'ordre de 6, la sensibilité des autoradios aujourd'hui proposés permet une réception satisfaisante de signaux FM avec cette antenne. Dans la référence [22], on trouve un système d'antennes sérigraphiées fonctionnant dans les bandes AM et FM. En utilisant les vitres latérales (pour l'AM) en plus du réseau de dégivrage, on améliore les performances réalisées dans la bande AM. Un circuit à base de composants discrets est ajouté pour adapter l'antenne. Les signaux RF sont découplés du DC grâce à une self de choc comme indiqué sur la figure 2.10.

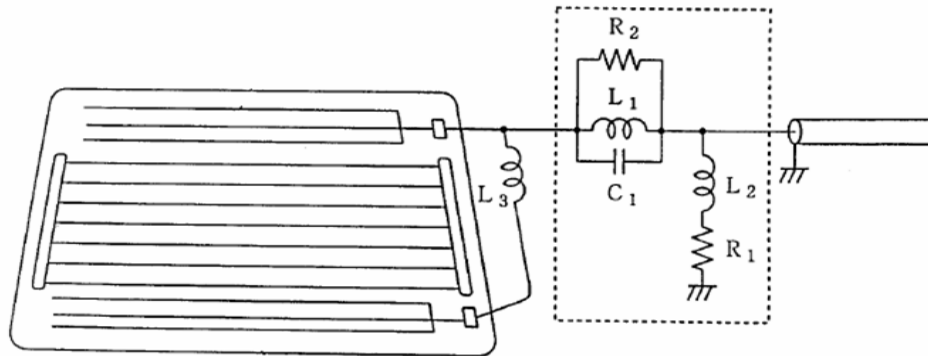


FIGURE 2.10 – Configuration de l'antenne avec son circuit d'adaptation à éléments passifs

Le rôle des différents composants du circuit résonant est détaillé ici.

- L_1 et L_2 : Inductances pour accorder le résonateur
- L_3 : Inductance pour empêcher le passage du HF
- R_1 et R_2 : Résistances pour diminuer le facteur Q pour la résonance
- C_1 : Capacité pour réaliser un filtre passe-haut laissant passer que la FM

Cette technique où les vitres latérales sont également utilisées comme support d'antennes sérigraphiées permet d'améliorer de 5dB le niveau de réception dans la bande AM comme le montre la figure 2.11.

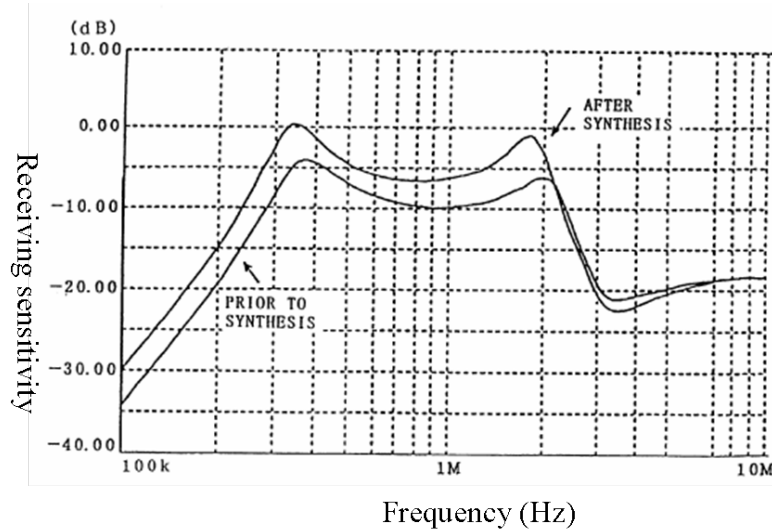


FIGURE 2.11 – Amélioration des performances d'une antenne sérigraphiée en AM grâce à l'utilisation des vitres latérales et du réseau de dégivrage

D'autres études menées dans le même sens utilisent la partie vitrée pour couvrir la bande AM/FM [23]. On montre dans [24] une méthode permettant de mettre à la masse des antennes sérigraphiées en prenant le toit du véhicule comme référence de masse.

Toutes ces technologies utilisent des conducteurs métalliques insérés (ou utilisation d'un dépôt par pulvérisation) entre les couches des parties vitrées des véhicules. Les faibles épaisseurs de ces métaux favorisent les pertes liées à la résistance et peuvent induire des performances modestes qui sont souvent améliorées à l'aide d'amplification. Leur position sur la partie vitrée peut également être à l'origine de problèmes de transparence. De ce fait, de nouvelles technologies basées sur l'utilisation de films transparents conducteurs ont également fait l'objet d'études [25] [26].

2.2.6 Les antennes transparentes

A l'image des antennes sérigraphiées, les antennes transparentes sont souvent insérées entre deux feuillets de verre des parties vitrées des véhicules. Elles sont essentiellement composées de films transparents conducteurs.

Les nombreuses études proposées sont basées sur l'utilisation du pare-brise ou de la lunette arrière pour réaliser ces antennes. La référence [27] propose, par exemple, d'utiliser la totalité de la lunette arrière pour réaliser deux antennes transparentes

dans la bande FM. Ces antennes sont alimentées par des cathodes en cuivre. Comme le montre la figure 2.12, la totalité de la vitre est utilisée pour réaliser ces deux antennes.

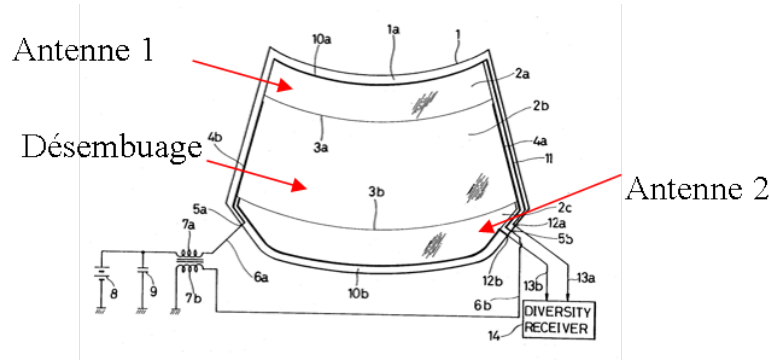


FIGURE 2.12 – Exemple de réalisation d'une antenne transparente

Sur la figure 2.12, nous constatons que la vitre est divisée en 3 parties grâce aux lignes 3a et 3b. La partie supérieure représente la première antenne (2a), la partie intermédiaire est utilisée pour le désembuage tandis que la partie inférieure constitue la deuxième antenne (2b). Ce type d'antenne nécessite généralement l'ajout d'une cellule d'adaptation. Des cellules d'adaptation à l'aide de transformateur d'impédance permettent d'optimiser l'adaptation de l'antenne (référence [28]).

Le principal inconvénient d'un tel système est qu'on ne sait pas si ce sont les brins en cuivre (cathodes alimentant les plaques de verre) ou le film conducteur lui même qui sont responsables du rayonnement. D'autre part, la difficulté de sa mise en œuvre et de sa maintenance rendent son exploitation difficile. Au delà de cet inconvénient propre à cet exemple, d'une manière générale les problèmes de ce type d'antennes restent leurs pertes très importantes liées à l'utilisation de matériaux organiques (principalement l'ITO ou le SnO_2). Cela justifie les optimisations proposées dans [29] pour améliorer l'efficacité de rayonnement des antennes transparentes (en insérant des systèmes d'aide à la détection avant l'antenne).

2.2.7 Les antennes GSM

Dans le domaine du GSM, les contributions sont nombreuses [30] [31] [32]. La référence [30], par exemple propose une antenne patch sur la partie vitrée d'un véhicule à proximité du toit afin de bénéficier du couplage basse impédance avec ce dernier (qui sert de plan de masse). Ceci permet d'améliorer le gain à l'horizon [33]. Ce sont des antennes, généralement de petites tailles, utilisant le véhicule comme plan de masse. Dans la référence [33], l'antenne proposée est constituée de deux plaques métalliques en "L" court-circuitées (figure 2.13).

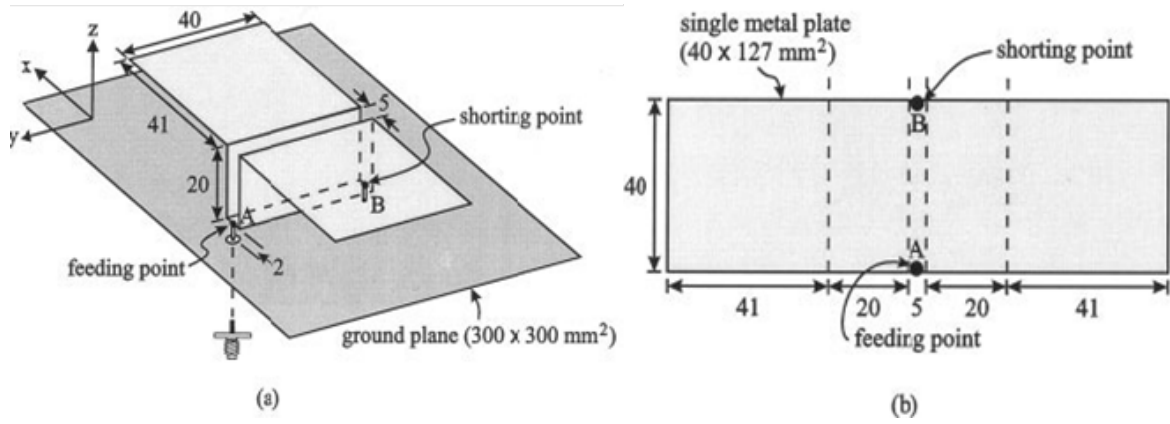


FIGURE 2.13 – Géométrie de l'antenne proposée avec un plan de coupe vertical

Ces plaques métalliques sont alimentées au point A tandis que le court-circuit s'effectue au point B. L'antenne est adaptée dans la bande [814MHz-984MHz] avec un gain compris entre 4.4 et 4.8dBi. Du fait de la symétrie de la géométrie de l'antenne, le diagramme en azimut (E_θ) est quasiment omnidirectionnel comme le montre la figure 2.14.

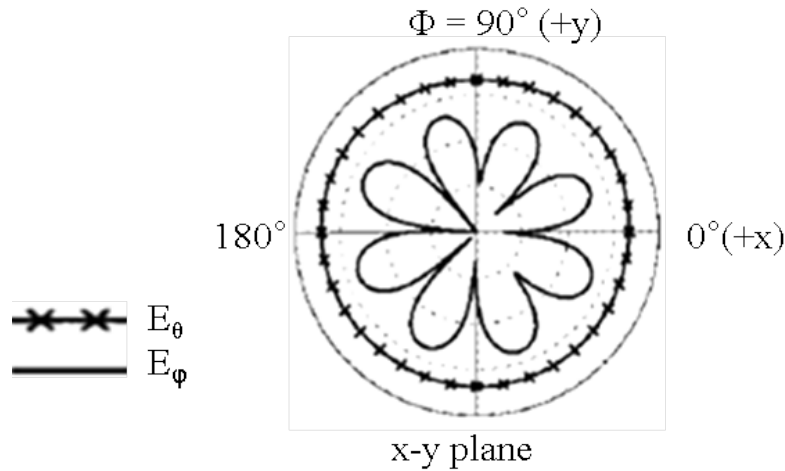


FIGURE 2.14 – Diagramme de rayonnement en azimut mesuré à 900MHz pour les composantes E_θ et E_ϕ

Son adaptation montre qu'elle peut être utilisée à la fois pour les bandes AMPS ([824MHz-894MHz]) et GSM avec un gain entre 4.2dBi et 4.8dBi sur toute la bande. Le principe de cette technique de miniaturisation consiste à mettre en place des discontinuités et une mise à la masse à des endroits appropriés. Une modification de la géométrie est proposée dans la référence [34]. Elle permet de couvrir les bandes DCS/PCS/UMTS.

Cette antenne pour application automobile est simulée et réalisée sans tenir compte du véhicule. Cela limite son utilisation car il est aujourd'hui admis que le diagramme de rayonnement d'une antenne est tributaire de son environnement.

D'autres techniques de miniaturisation dans la bande GSM ont été appliquées pour obtenir des antennes intégrables dans les combinés mobiles [35] [36]. Ces résultats intéressants laissent imaginer leur application dans le domaine de l'automobile. Cette utilisation passe tout de même par une prise en compte de l'environnement véhicule et notamment de l'étude de l'effet du plan de masse.

2.2.8 Les antennes pour communications satellitaires (radio-numérique, GPS,...)

Tout récemment, avec l'apparition de la radio numérique, d'autres types d'antennes ont été élaborés. Elles sont généralement plaquées sur le toit du véhicule [37] de façon à présenter un aspect harmonieux et en accord avec les goûts actuels du public. Elles concernent pour la plupart les communications satellitaires.

Les performances des antennes optimisées seules sont généralement dégradées une fois intégrées dans le véhicule. Dans la référence [37] par exemple, une comparaison des diagrammes de rayonnement d'une telle antenne est faite en fonction de la forme du plan de masse. L'utilisation d'un disque à la place d'un plan conducteur infini (PEC) fait apparaître des ondulations et la variation du rayon du disque conditionne l'amplitude de ces ondulations. Cette étude est faite pour l'application satellite de la radio numérique SDAR (Satellite Digital Audio Radio) dans la bande 2.4GHz disponible aux USA par l'intermédiaire des satellites SIRIUS et XM. Sur la figure 2.15, on montre les spécifications en terme de gain pour les antennes recevant ces signaux satellite.

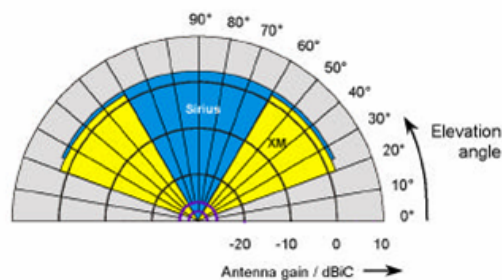


FIGURE 2.15 – Diagramme de rayonnement requis pour la radio numérique pour deux types de satellite (XM et SIRIUS)

Ces spécifications du gain de l'antenne en fonction de l'élévation imposent un diagramme à gain constant de 2dBi pour XM (ouverture entre 20°et 60°puis entre 120°et 160°) sur la demie sphère supérieure et 3dBi pour Sirius. Particulièrement, pour Sirius,

le diagramme doit être omnidirectionnel et présenter une large ouverture (60° dans les plans verticaux). Ces spécifications ne peuvent théoriquement être respectées qu'avec une antenne tridimensionnelle omnidirectionnelle montée au dessus d'un plan de masse infini. Sur la figure 2.16, une antenne hélice quadri-filaire est disposée au centre d'un plan de masse parfaitement conducteur, circulaire, de diamètre $1m$. Cette antenne est sensée proposer des solutions proches des spécifications présentées sur la figure 2.15.

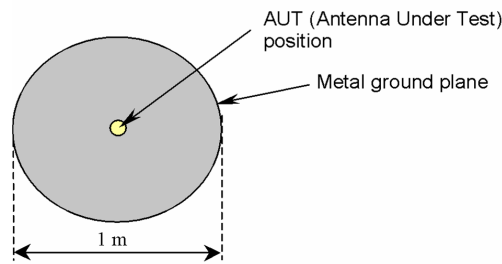


FIGURE 2.16 – Plan de masse circulaire avec son antenne sous test en son centre

Des simulations de l'antenne hélice quadri-filaire ont été successivement réalisées sans plan de masse, avec un plan de masse infini et avec un plan de masse de diamètre $1m$. La figure 2.17 montre les diagrammes obtenus pour ces trois configurations.

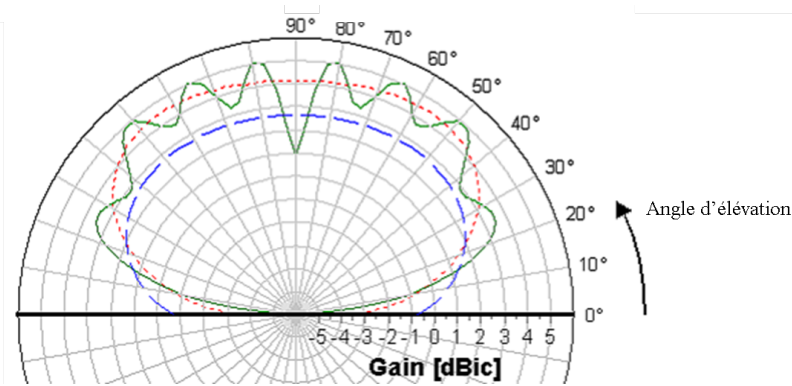


FIGURE 2.17 – Diagrammes de rayonnement pour les différentes configurations

- a.) Plan de masse conducteur parfait et infini (PEC - - -),
- b.) Sans plan de masse (- - -)
- c.) Un plan de masse d' $1m$ de diamètre (- - -).

Pour le cas particulier de l'application XM (trou dans l'axe), l'antenne utilisée est une hélice quadri-filaire fonctionnant en mode monopolaire. Le résultat montre que le plan de masse joue un rôle important dans les caractéristiques de l'antenne (voir figure 2.17). Lorsque le plan de masse est circulaire (de diamètre $1m$), une ondulation significative de l'ordre de 2dB est observée. Les ondulations sont dues aux diffractions des courants se propageant sur les arrêtes du disque. Pour réduire ces ondulations,

on modifie la géométrie du disque en ajoutant une "jupette" sur le pourtour de ce dernier (figure 2.18). Le résultat est représenté sur la figure 2.19. Après comparaison avec la figure 2.17, on note que les ondulations sont largement atténuées.

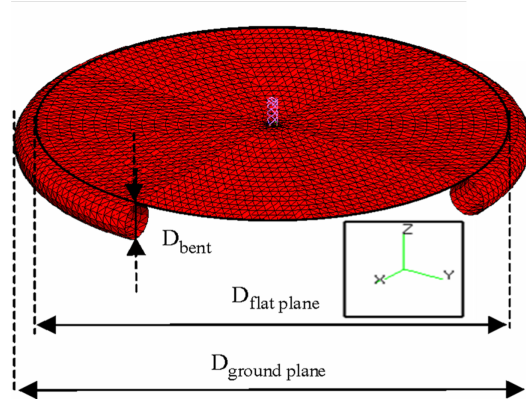


FIGURE 2.18 – Modification des arrêtes du plan de masse circulaire de l'antenne de réception de radio numérique par satellite

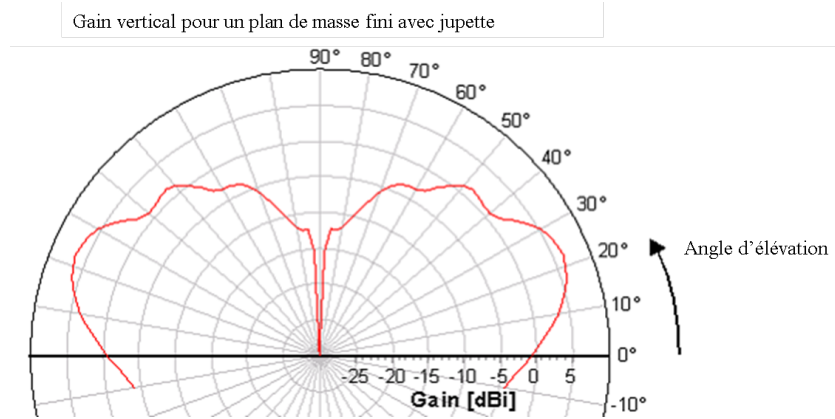


FIGURE 2.19 – Diagramme de rayonnement obtenu avec un plan de masse modifié (ajout de la "jupette")

Dans le cadre de cette application à la réception de signaux radioélectriques diffusés par satellite, nous venons de rappeler l'influence du plan de masse (sa forme et ses dimensions) sur les diagrammes de rayonnement des antennes. En complément, des mesures en chambre anéchoïque des diagrammes de rayonnement ont montré des dégradations dues à la position de l'antenne dans son environnement réel de fonctionnement [38]. Cette fois, l'antenne utilisée est une hélice fonctionnant dans le mode directif pour l'application SIRIUS (pas de trou dans l'axe). On montre à travers la figure 2.20 que si l'antenne est au centre du toit (position1, figure 2.21), on obtient des résultats proches de ceux que l'on a eus dans le cas d'un plan de masse circulaire de diamètre $1m$ (voir figure 2.17).

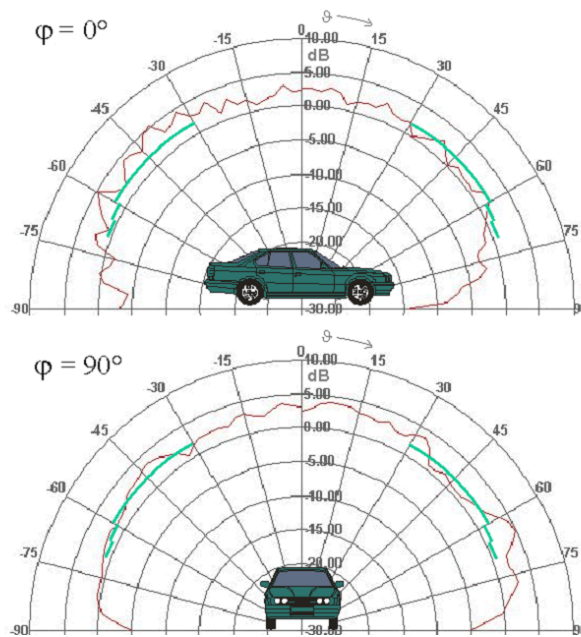


FIGURE 2.20 – Diagrammes de rayonnement pour une antenne hélice (réception signaux SDAR) au centre du toit d'un véhicule

Les spécifications (figure 2.15) ne sont pas satisfaites pour tous les angles d'élévation à cause des ondulations particulièrement dans le plan $\phi=0^\circ$. Les ondulations sont moins importantes sur le plan $\phi=90^\circ$; ceci est probablement dû à une meilleure symétrie du véhicule.

Du fait des différentes ouvertures (toit ouvrant, vitré...), dans la pratique, l'antenne n'est pas placée au centre du véhicule mais souvent à 10cm de l'arrière du toit comme indiqué sur la position2 de la figure 2.21.

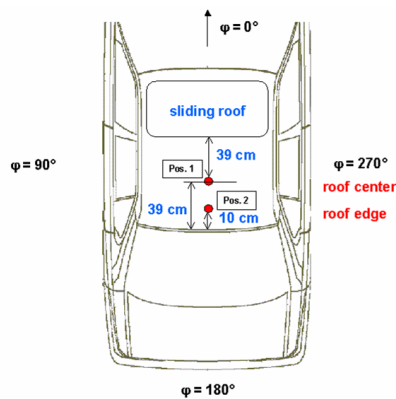


FIGURE 2.21 – Position des antennes sur le toit d'un véhicule

Tous les diagrammes montrés sur les figures précédentes sont en polarisation circulaire dans la bande 2.4GHz. Deux modes de fonctionnement sont possibles. Un premier mode avec un diagramme à grande ouverture et un second à diagramme monopolaire. Cette propriété montre que ce type d'antenne, dans le cas où elle fonctionne en mode large ouverture permet de respecter les spécifications données sur le satellite Sirius mais également sur XM.

Par contre en mode monopolaire, elle ne peut être utilisée que pour recevoir des signaux venant du satellite XM. Ces deux services sont aujourd'hui présents et utilisés en Amérique du nord dans la cadre de la nouvelle norme d'utilisation de la radio numérique.

Dans un autre contexte, d'autres études ont aussi été menées sur l'influence de la position de l'antenne sur le véhicule [39]. Elles se portent sur la comparaison des performances d'un dipôle quart d'onde classique (ou demi-onde) utilisé en polarisation verticale et d'un réseau d'antennes en fonction de la position des antennes sur le toit du véhicule. Cela a été appliqué dans de nombreuses applications telles que la géolocalisation (GPS). D'autres études menées [40] proposent un réseau d'antennes adaptatives allant dans le sens de l'amélioration de l'homogénéité du diagramme de rayonnement.

Dans la référence [41], un réseau d'antennes au dessus du toit du véhicule est étudié dans le but de satisfaire les spécifications des communications dans la bande GPS (voir figure 2.22).

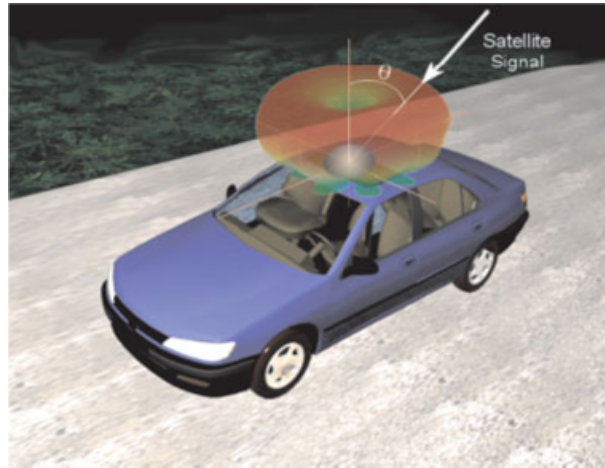


FIGURE 2.22 – Caractéristiques idéales du diagramme de l'antenne en GPS au dessus du toit du véhicule en mouvement

Le réseau est constitué d'antennes patch circulaires pouvant avoir des gains de 5dBi dans la bande qui couvre le GPS. Ce travail vient compléter une étude antérieure de l'auteur sur ce concept [42].

2.2.9 Les antennes pour communications inter-véhicule

Différentes contributions ont relevé le besoin d'une communication entre les véhicules [43] [44] [45] (concept Car To Car ou Communication inter Véhicule). Le concept de communications dit C2C (Car To Car en anglais) implique l'utilisation d'antennes directives à gains élevés [46] [47] permettant des échanges entre le véhicule et son environnement. Ces applications se trouvent sur plusieurs bandes de fréquence comme par exemple 2.45GHz, 5.8GHz, 60GHz...

Les antennes dédiées aux applications C2C sont généralement montées sur la partie extérieure de la structure du véhicule et la position de l'antenne est un élément important pour ses performances. Par exemple dans la référence [48], on étudie l'influence de la position de l'antenne sur le canal de propagation (variation des propriétés du canal avec la vitesse et de la position des véhicules communicants). La figure 2.23 (référence [49]) montre également un scénario illustrant le besoin de directivité mais également de reconfiguration.

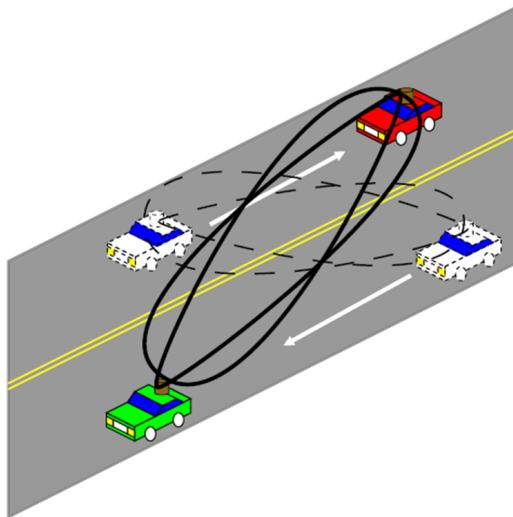


FIGURE 2.23 – Exemples d'orientation de diagrammes dans une communication de type C2C

Sur la figure 2.23, un réseau d'antennes directif opérant à 2.4GHz est utilisé. La liaison de type point à point nécessite un diagramme de rayonnement directif. De plus, du fait de la mobilité des deux véhicules, les diagrammes doivent être reconfigurables dans le temps.

Une étude a été faite chez certains constructeurs automobiles [50] [51] sur l'intégration d'un réseau d'antennes patch à 5.8GHz (pour des applications de type télépéage par exemple) sur le pare-brise d'un modèle de véhicule réduit à l'échelle $\frac{1}{2}$. La figure 2.24 montre la position de l'antenne ainsi que les distributions de courant sur le véhicule.

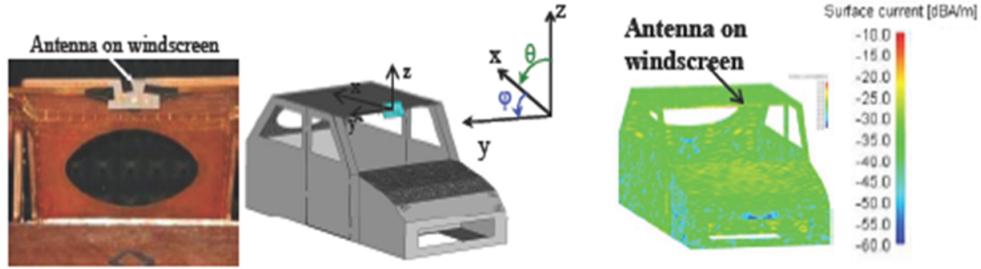


FIGURE 2.24 – Antenne au dessus du véhicule à l'échelle $\frac{1}{2}$ et répartition de courant correspondante à 5.8GHz

Comme nous le constatons, la répartition des courants surfaciques montre que pour cette position de l'antenne, ces derniers sont localisés sur le capot. Cette observation est confirmée par le diagramme de rayonnement représenté sur la figure 2.25. En effet, sur cette figure, on remarque que le maximum de gain est obtenu dans le secteur du capot.

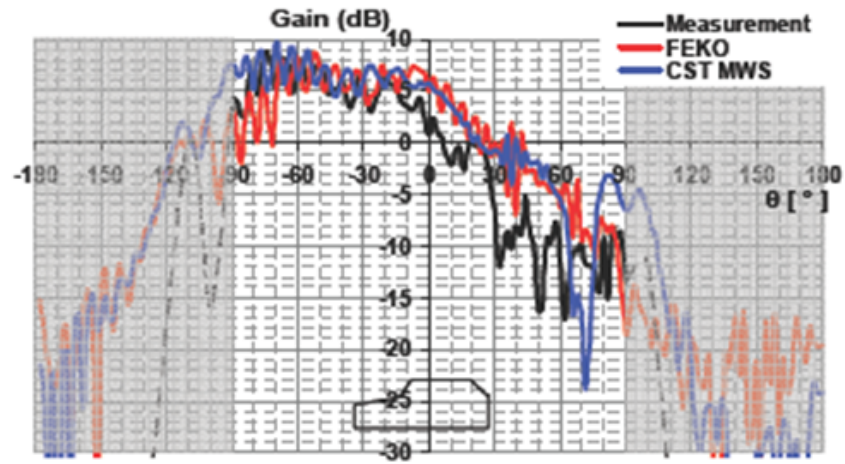


FIGURE 2.25 – Variation du gain en fonction de l'angle θ obtenu avec l'antenne présentée dans la figure 2.24 (vue de côté)

La partie grise correspond à la région se situant en dessous du véhicule de taille réduite.

2.2.10 Les antennes pour Radar anticollision

Les systèmes de transport intelligent (Radar anticollision [52] [53]), utilisent des antennes reconfigurables en bandes millimétriques. Les spécifications exigent deux types d'antennes en fonction de la portée visée :

- Radar courte portée à 24GHz (une dizaine de mètres) avec une large ouverture du diagramme de rayonnement (contrôle d'angle mort).
- Radar longue portée à 77GHz (une centaine de mètre) avec un faisceau plus directif.

La figure 2.26 (référence [54]) montre une illustration des gabarits des diagrammes.

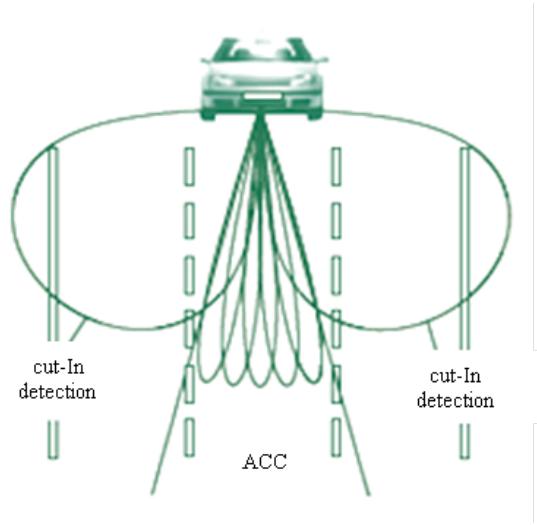


FIGURE 2.26 – Gabarit des diagrammes de rayonnement requis pour une communication Radar anticollision

La référence [55] utilise une lentille sphérique en Téflon ($\epsilon=2.1$) dont le but est de générer une onde plane à la sortie de la lentille (voir figure 2.27).

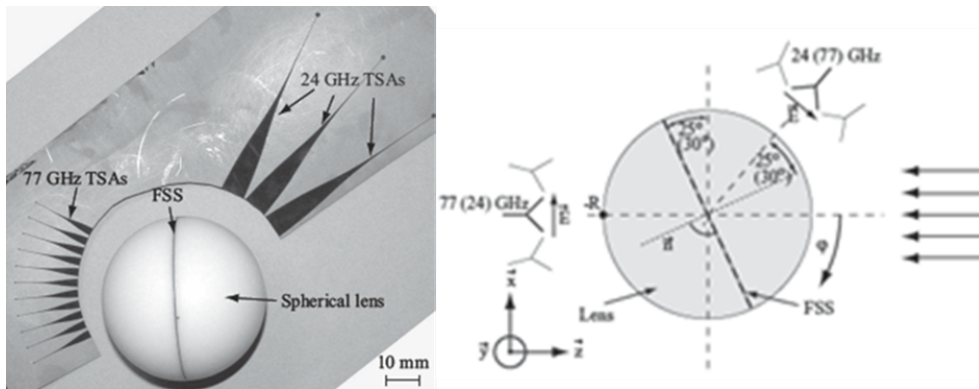


FIGURE 2.27 – Lentille sphérique en téflon utilisée pour la focalisation du faisceau

Elle permet de réaliser une antenne bi-bande directive (24GHz et 77GHz) grâce à l'utilisation d'une surface sélective en fréquence (FSS-Frequency Selective Surface) à base de cuivre déposé par photolithographie sur du Duroïd ($\epsilon=2.2$). Cette surface

est insérée entre les deux hémisphères de la lentille et fonctionne selon deux modes différents.

- réflective à 24GHz et transparent à 77GHz.
- réflective à 77GHz et transparent à 24GHz.

2.2.11 Autres types d'antenne

Jusqu'à ce stade de l'état de l'art, nous nous sommes cantonnés à des applications n'impliquant pas les fonctionnalités du véhicule mais plutôt à des accessoires améliorant les conditions des occupants du véhicule (autoradio, GPS...). Cependant, il ne faut pas exclure les systèmes de communications qui impliquent les fonctions essentielles des véhicules. On peut citer les systèmes d'ouverture des portes à distance qui sont également munis d'antennes. Ces systèmes fonctionnent à 315MHz ou 433MHz selon que l'on se trouve en Europe, en Asie ou sur le continent nord américain. Dans la référence [56], une antenne bas coût pour ouverture à distance est proposée. Comme le montre la figure 2.28, elle est constituée d'un fil conducteur dont l'une des extrémités est en espace libre grâce à une ouverture (2) faite sur le toit (1) du véhicule tandis que l'autre est reliée au système de commande de l'ouverture (21) et (22).

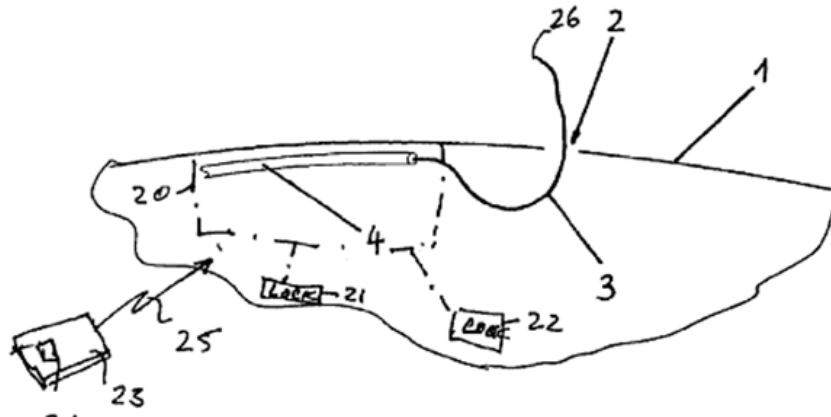


FIGURE 2.28 – Présentation de l'antenne placée sur le toit du véhicule

Le fil (faisant office d'antenne) correspond à l'âme d'un câble coaxial (4) dont la gaine est reliée à la structure du véhicule. Cette antenne est facilement intégrable dans un véhicule ayant une antenne fouet au dessus de son toit.

La multiplication des services embarqués sur un véhicule entraîne inévitablement la multiplication des antennes. Une solution pour réduire le nombre d'aériens consiste à proposer une antenne très large bande qui couvre toutes les bandes. Les antennes spirales ont fait l'objets d'études dans ce sens.

Ce sont des antennes dont la géométrie est définie uniquement par des angles. Leurs caractéristiques sont déterminées par leurs formes et leurs dimensions rapportées à la longueur d'onde. Les propriétés d'une telle antenne restent conservées à la suite d'une transformation continue de ses dimensions (homothétie par exemple). Contrairement aux techniques utilisant des structures résonantes, cette approche consiste à générer une antenne dont le rayonnement reste indépendant de la fréquence de travail.

Si l'on place ce type d'antenne sur une surface absorbante large bande, on peut envisager des applications où ces antennes seront elles-mêmes large bande et plates, donc, facilement intégrables dans un véhicule.

Dans le cas classique, l'alimentation de ce type d'antenne se fait en son centre. Si on envisage d'intégrer une telle antenne sur la lunette arrière, la mise en place de la cavité est impossible car dans ce cas, l'antenne masquerait la visibilité nécessaire par l'arrière du véhicule (figure 2.29).

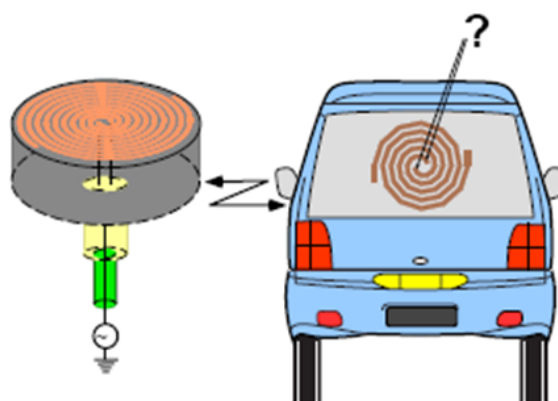


FIGURE 2.29 – Illustration de la problématique de l'alimentation dans l'installation de l'antenne

Malgré ces résultats, ce type d'antenne ne peut être utilisé sur les vitres du fait des problèmes d'impact visuel qu'elle engendre. La figure 2.30 en est une illustration.



FIGURE 2.30 – Antenne spirale placée sur la lunette arrière d'un véhicule : illustration de la dégradation de l'impact visuel

Ces antennes spirales peuvent malgré tout être installées dans la structure du véhicule. Cela permet d'effectuer une alimentation par le centre [57]. Ainsi des signaux terrestres et satellitaires peuvent être reçus par la même antenne. Pour cela, une antenne spirale [58] alimentée par une ligne coplanaire ayant un fonctionnement multi-modes a été étudiée. Ce mode d'alimentation utilise un double accès [59] (génération d'un mode dit "Coplanaire Waveguide Mode" et d'un second dit "Coupled Slot Mode"). La figure 2.31 montre l'antenne réalisée ainsi que son installation sur le toit d'un véhicule.

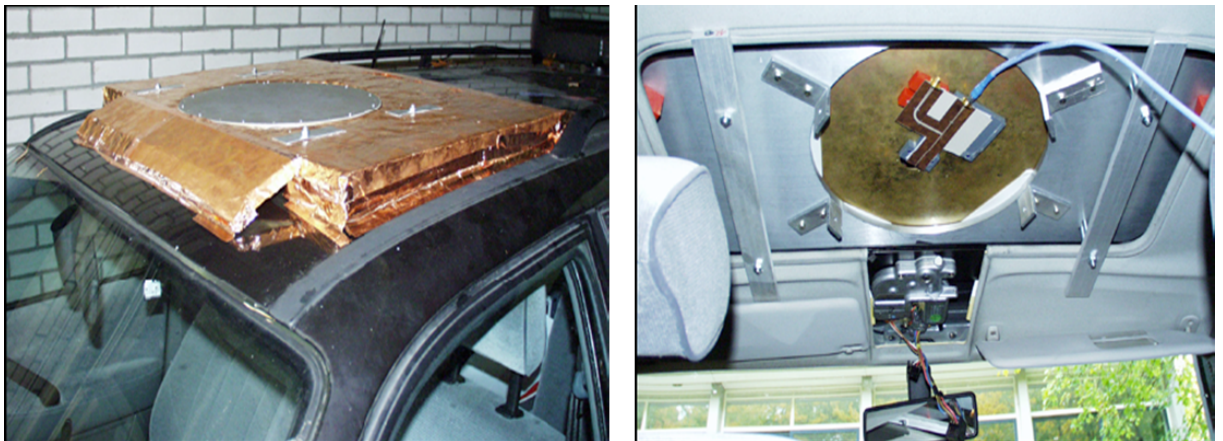


FIGURE 2.31 – Antenne spirale placée sur le toit d'un véhicule : illustration de l'encombrement

Ce prototype a été mesuré. La figure 2.32 montre le résultat pour les deux signaux (terrestre et satellitaire) ainsi que le couplage généré par l'alimentation des deux ports.

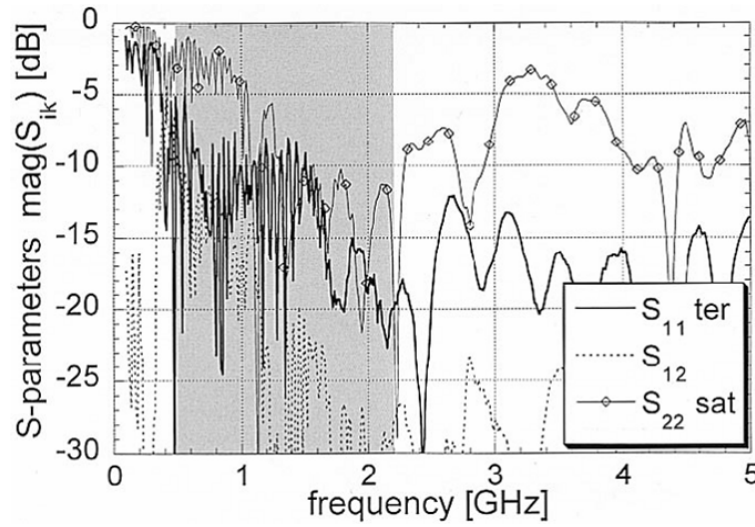


FIGURE 2.32 – Coefficient de réflexion de l'antenne pour les signaux terrestres et satellitaires ainsi que le couplage entre les deux accès

Ce résultat montre que cette antenne peut être utilisée mais elle reste encombrante. De plus, même si l'adaptation est satisfaisante, le couplage entre les deux accès reste important.

2.3 Technologies d'antennes émergentes pour l'automobile

Des évolutions significatives dans le développement des métamatériaux ont été observées ces dernières années. Ces matériaux innovants permettent un développement d'antennes performantes présentant des tailles réduites. Ceci justifie leurs intérêts dans le domaine automobile. Par exemple nous pouvons citer les antennes miniatures à base de matériaux innovants... [60] [61]. Par ailleurs, de nouveaux concepts d'antennes sont apparus avec l'arrivée des lentilles plates et des "super lentilles" [62] pouvant permettre de s'affranchir de l'encombrement des lentilles classiques. Ces lentilles peuvent par exemple permettre d'augmenter la directivité des antennes pour Radar anticollision. La référence [63] propose un réseau d'antennes à base de métamatériaux rendue directif à l'aide d'une lentille biconcave. Les propriétés physiques d'une telle lentille favorisent l'atténuation des lobes secondaires des diagrammes de rayonnement. La lentille est réalisée grâce à un matériau artificiel à indice de réfraction négative développé par C. Caloz et al. La figure 2.33 montre que le réseau d'antennes peut facilement être intégré dans un véhicule.

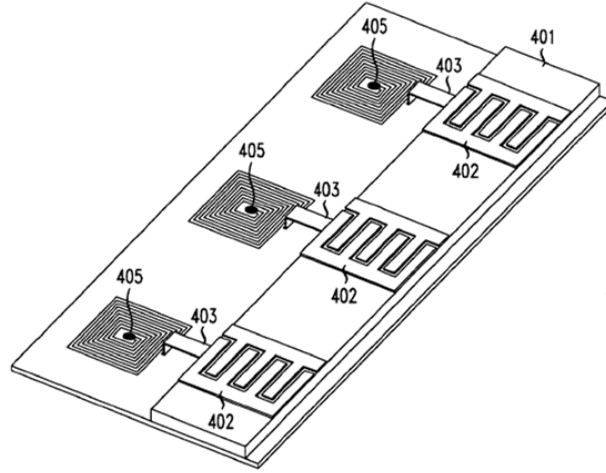


FIGURE 2.33 – Vue de dessus du réseau d'antennes réalisé par C. Caloz et al.

Des études plus récentes proposent des antennes à base de matériau composite [64] pour améliorer les performances du diagramme de rayonnement vis-à-vis de l'environnement. Malgré leur facilité d'intégration dans un véhicule (due à leurs surfaces plates), ces antennes présentent plusieurs sources de pertes en particulier dues à la dissipation d'énergie par les matériaux composites.

2.4 Effet du véhicule sur les performances des antennes

Toutes les performances des antennes jusqu'ici présentées sont tributaires du véhicule. Dans la partie qui suit, nous analysons l'influence du véhicule sur les performances de l'antenne à travers quelques exemples. Depuis plusieurs années, la peinture métallique a fait son apparition dans le domaine de l'automobile. De nombreuses expériences ont montré que ces peintures dégradent les performances de la polarisation croisée [65], du bruit thermique de l'antenne [66] mais également du gain [67] [68] des antennes.

Dans la référence [68], une comparaison du S_{11} d'une antenne patch fonctionnant à 1.575GHz (GPS) et recouverte par différents modèles de revêtement a été réalisée. L'antenne est simulée pour différentes configurations. Dans un premier temps, afin de constituer une référence, l'antenne est simulée seule sans être recouverte par un dépôt de peinture. Du fait des défauts de réalisation, l'antenne résonne à 1.583GHz. Puis, l'antenne est de nouveau simulée en déposant sur la partie rayonnante, dans un premier temps de la peinture non métallisée, puis de la peinture métallisée avant de finir par un dépôt de cuivre. Les résultats du calcul théorique de l'adaptation sont consignés sur la figure 2.34.

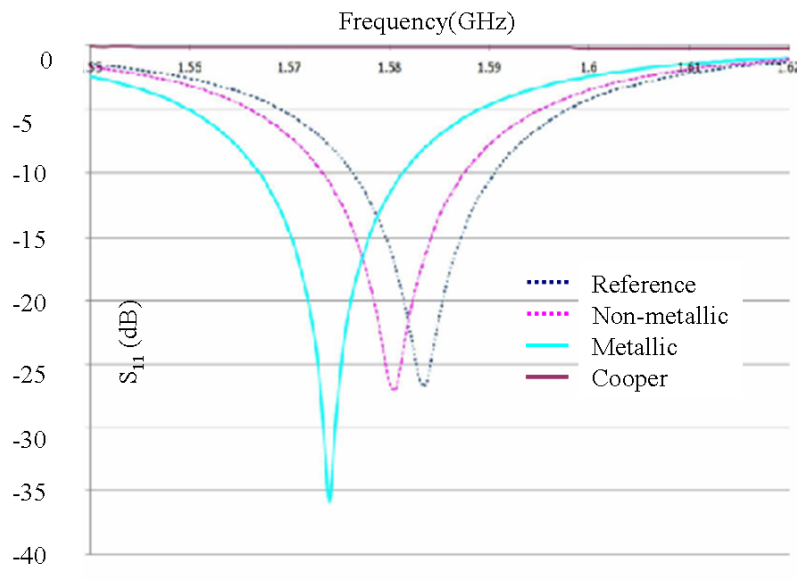


FIGURE 2.34 – Comparaison des S_{11} pour différentes natures de dépôt recouvrant une antenne GPS sur la carrosserie d'un véhicule

Le dépôt de cuivre au dessus de l'élément rayonnant empêche tout simplement le rayonnement de l'antenne puisque l'ajout de cuivre correspond à un blindage de l'élément rayonnant. Le dépôt de peinture non métallique génère un décalage de fréquence sans modifier l'adaptation ; dans ce cas, la peinture joue un rôle équivalent à celui d'un diélectrique sur l'antenne. Enfin, la peinture métallique modifie à la fois l'adaptation et la fréquence centrale de résonance.

Ces ajouts de peinture métallisée (ou pas) conduisent à des atténuations du gain très modestes. Les diagrammes présentés sur la figure 2.35 confirment les remarques faites sur le gain dans les plans H et E de l'antenne.

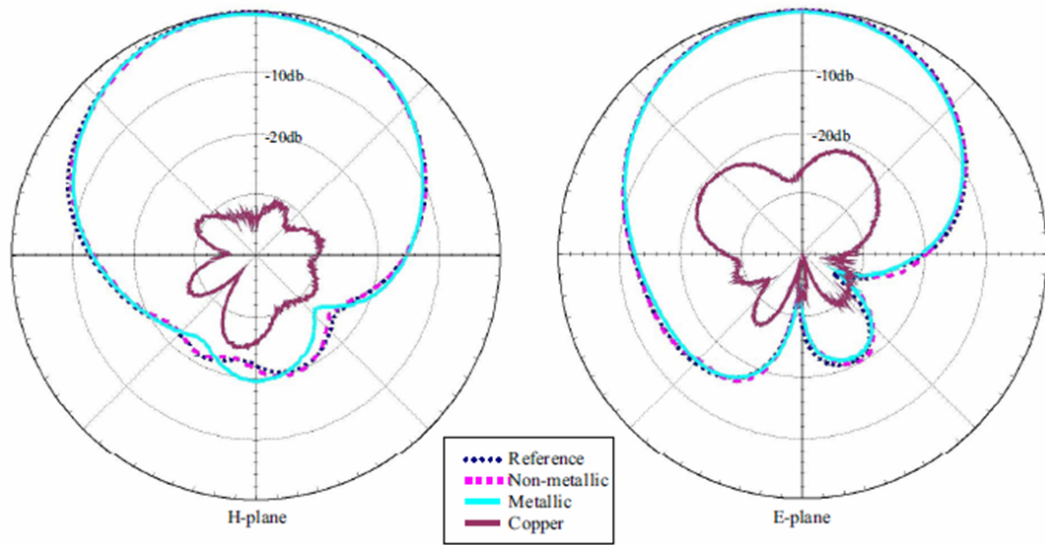


FIGURE 2.35 – Diagramme de rayonnement de la composante principale d'une antenne GPS recouverte de différents revêtements (cuivre, peinture métallisée,...) comparé à une référence

Dans les exemples d'antennes utilisées dans le domaine de l'automobile cités dans les paragraphes précédents, le véhicule est un support de l'antenne. Dans ce cas, il participe à l'amélioration du diagramme de rayonnement du fait de son rôle de plan de masse. Dans d'autres cas, le véhicule peut jouer le rôle d'un plan réflecteur ou même d'élément rayonnant. Ces propriétés sont étudiées dans la partie suivante et c'est ce que nous appelons le concept "car-antenna".

2.5 Le concept car-antenna

Le principe consiste à exciter directement la structure du véhicule (qui devient par conséquent une antenne) par un câble coaxial ou indirectement par couplage par l'intermédiaire d'une antenne secondaire. Dans cette partie, nous présentons les détails de cette technique.

2.5.1 Cas d'une excitation par une antenne secondaire

Différents types d'antennes peuvent constituer l'excitateur. L'exemple pris dans la référence [69] est une antenne conique avec un sommet sur lequel on dispose un disque capacitif. L'antenne comprend, en outre, un isolant disposé entre le disque et le cône. Un câble coaxial permettant de prélever le signal est placé au sommet. Ce câble passe par l'intérieur du cône et précisément sur son axe de symétrie. Le potentiel est appliqué entre le disque et le cône (voir figure 2.36).

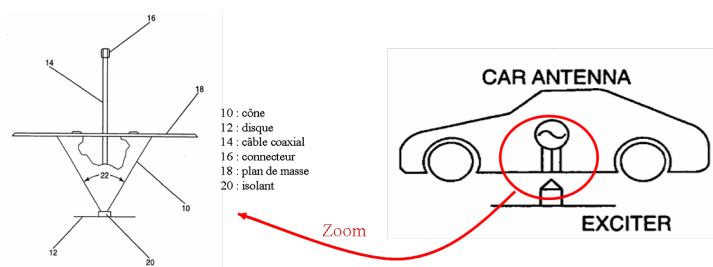


FIGURE 2.36 – Antenne excitatrice de type disc-cône placée en dessous d'un véhicule

Ce système possède au moins 3 modes de fonctionnement :

- L'antenne secondaire rayonne en haute fréquence .
- Le véhicule rayonne en basse fréquence, et dans ce cas, l'antenne sert d'excitateur.
- L'antenne et le véhicule rayonnent en même temps pour les fréquences intermédiaires.

La plus basse fréquence est déterminée par la taille du véhicule tandis que la plus haute dépend, elle, de la taille de l'antenne secondaire (disc-cône). D'après [69], un tel dispositif peut permettre un rayonnement dans la bande [0.5GHz-2GHz]. L'antenne excitatrice peut être montée n'importe où sur le véhicule ; à l'intérieur comme à l'extérieur. La figure 2.37 ci-dessous montre le ROS sur une bande [500MHz-2GHz].

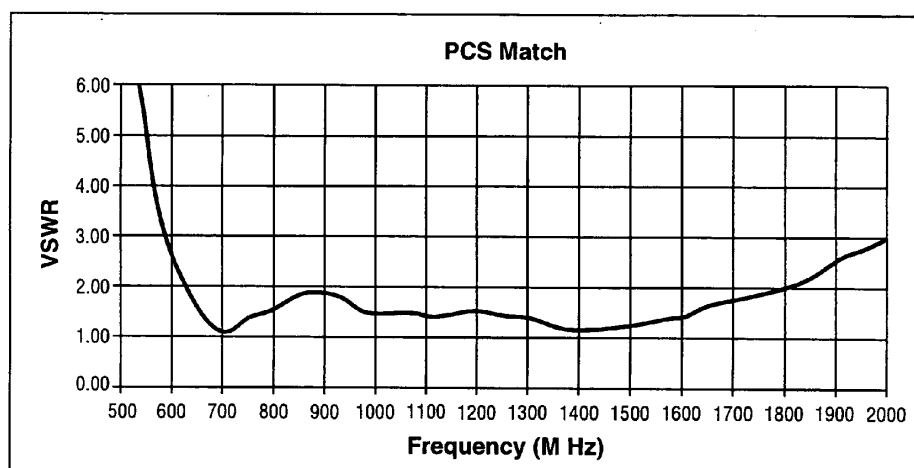


FIGURE 2.37 – ROS du car-antenna excité par une antenne de type disc-cône

A l'extérieur du véhicule, il est préférable de positionner l'antenne sur un axe se situant approximativement entre 30 et 60cm de la partie avant du véhicule (par exemple les pare-chocs avant) La référence [69] montre alors un ROS inférieur à 2 entre 650MHz et 1800MHz. On peut aussi placer l'antenne à l'intérieur du véhicule. La référence [70] nous montre quelques autres méthodes d'excitation utilisant le véhicule comme support de propagation (suppression du câblage).

2.5.2 Cas d'une excitation du véhicule par un câble coaxial

2.5.2.1 Excitation directe d'une partie du véhicule

A la fin des années 40, un brevet [71] allant dans le sens de l'utilisation de la structure du véhicule comme antenne a été posé. Dans ce brevet, l'auteur identifie des boucles électriques sur la structure du véhicule que l'on isole électriquement du reste du châssis par le biais d'éléments isolants (voir figure 2.38). Chaque boucle est alimentée directement par un câble coaxial.

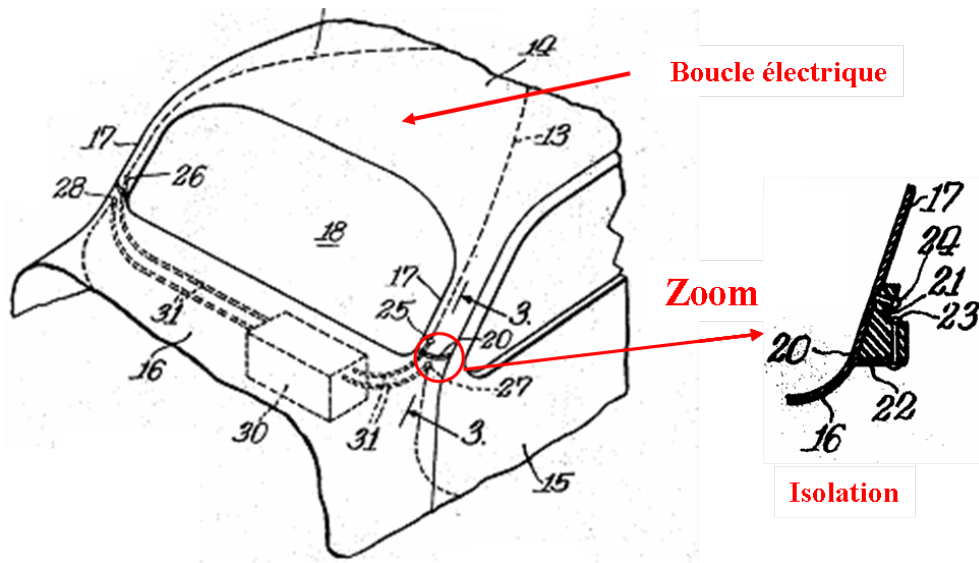


FIGURE 2.38 – Identification des boucles électriques

Le prélèvement du signal HF se fait en (25), (26), (27) et (28). Les points (25) et (26) sont branchés sur la boucle électrique qui se situe au niveau du toit. Par contre, (27) et (28) sont sur la boucle qui constitue l'un des ouvrants ; une mise à la masse est ainsi assurée. Entre ces deux boucles, nous pouvons voir qu'un élément est inséré afin d'assurer l'isolation électrique (voir zoom sur la figure 2.38).

Cette isolation se situe entre le capot moteur (16) et le support du toit (17). Cette même pièce est utilisée pour les deux bords du pare-brise (18). Pour chaque application, une boucle électrique dédiée est identifiée. Cette invention, bien qu'originale, revient à implanter des antennes sur la structure du véhicule. D'autre part, telle que la conception est décrite, c'est le véhicule qui subit la réalisation de l'antenne ; ce qui peut devenir très vite coûteux lors du développement.

2.5.2.2 Excitation directe de tout le véhicule

Plus récemment encore, des études ont montré que l'on pouvait s'affranchir de ces boucles électriques pour faire du véhicule un élément rayonnant. Il s'agit donc de brancher directement sur le châssis du véhicule l'âme d'un câble coaxial [72] afin de

prélever le signal utile. L'idée fondamentale consiste à utiliser la structure métallique du véhicule sur laquelle circulent naturellement des courants en tant qu'antenne. Le récepteur radio est relié au châssis du véhicule en un point spécifique par l'intermédiaire d'un câble de l'ordre d'une longueur d'onde. La particularité de cette invention est que la gaine du câble coaxial est flottante à la fois du côté de l'appareil et du châssis du véhicule. La figure 2.39 montre la configuration mise en œuvre.

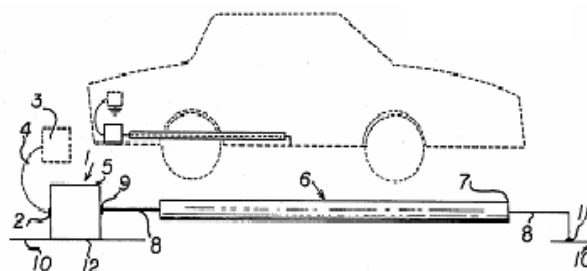


FIGURE 2.39 – Configuration du système antenne avec le câble coaxial ainsi que le point spécifique d'accès

Le câble (6) est relié au châssis (10) au point central de contact (11). La liaison avec l'appareil radio se fait par l'intermédiaire d'un boîtier (1). La liaison avec le boîtier se fait avec le connecteur (9) se situant à l'extrémité de l'âme (8). Le boîtier est aussi relié au châssis du véhicule au point (12). Comme indiqué précédemment, la gaine (7) est flottante des deux côtés. La réalisation est détaillée sur la figure 2.40.

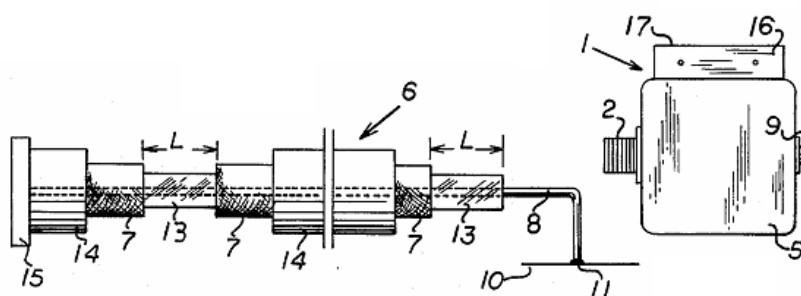


FIGURE 2.40 – Modification du câble d'alimentation

Un gap L est réalisé avant le branchement sur le châssis du véhicule. Il permet d'éviter un court-circuit de l'élément rayonnant. L'impédance ramenée par le véhicule étant désadaptée, un circuit d'adaptation en T ou en Π est associé au véhicule. Ceci permet d'obtenir un ROS inférieur à 1.3 sur la bande FM.

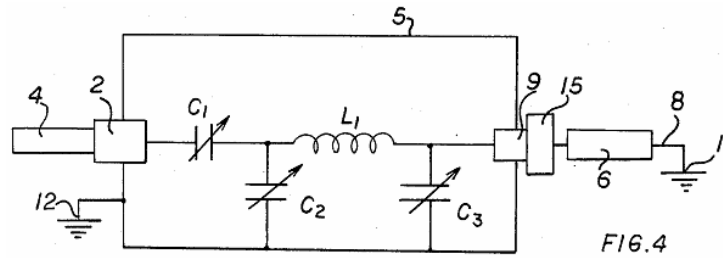


FIGURE 2.41 – Cellule d'adaptation d'impédance utilisée pour améliorer la réception en *FM*

Ce dispositif a été testé principalement dans la bande FM mais il peut tout de même fonctionner dans la bande UHF. Son principal inconvénient est la limitation du nombre de points d'accès. Egalement, la gaine flottante peut générer des problèmes de compatibilité électromagnétiques (protection contre la foudre par exemple).

2.5.3 Cas d'une utilisation des ouvertures existantes pour réaliser des antennes fentes

D'autres études proposent de profiter des fentes existant sur la structure du véhicule pour réaliser des antennes. Dans la référence [73] par exemple, la fente qui existe entre la porte arrière d'un véhicule et le reste de la structure est utilisée pour réaliser une antenne.

Dans la référence [74], une antenne réalisée sous forme de fente annulaire est intégrée dans la structure du véhicule (ce dernier joue le rôle de cavité). Il s'agit particulièrement d'une porte isolée (électriquement) du reste du véhicule par de la matière isolante (figure 2.42). Les dimensions de la porte et donc de l'antenne fente annulaire conduisent à faire fonctionner cette antenne sur une bande VHF réduite à 30–90MHz.

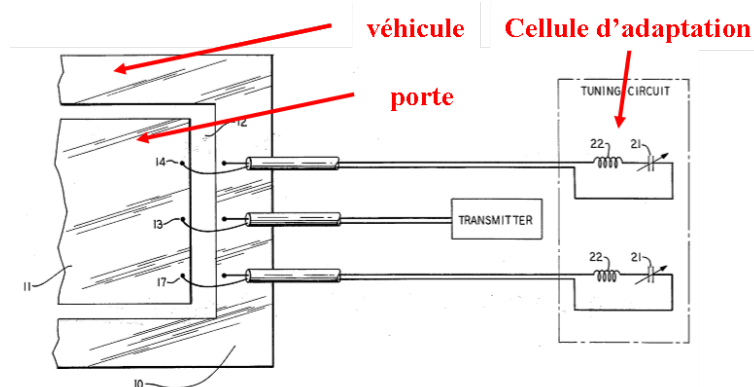


FIGURE 2.42 – Représentation de l'antenne fente utilisant la porte et le reste d'un véhicule

La connexion est établie entre la porte (11) et le reste du véhicule (10) ; une isolation électrique est ainsi faite grâce au diélectrique constituant la fente (12). Une adaptation d'impédance est réalisée avec l'aide des circuits LC (self (22) et capa (21)).

L'inconvénient majeur de cette invention se situe au niveau du système de récupération du signal. En fait, avec le système de prélèvement de l'énergie de part et d'autre de la fente, il devient impossible d'ouvrir la porte complètement. De ce fait, l'utilisation initiale du caisson devient difficile. D'autres études [75] [76] proposent l'utilisation de l'isolement électrique des parties vitrées du véhicule pour réaliser une antenne fente. Dans ce cas, les dimensions de la fente (dont dépend sa fréquence de résonance) sont imposées par la taille du véhicule, et par voie de conséquence, ceci ne permet de s'adapter aux bandes de fréquences où se trouvent les applications ciblées.

2.6 Bilan

Cet état de l'art, bien que non exhaustif, a permis de décrire différents types d'antennes équipant les véhicules. Nous pouvons, par exemple, citer les antennes fouet, les antennes sérigraphiées, les antennes patch... Celles-ci constituent la grande majorité des antennes utilisées par les constructeurs.

Des tentatives plus originales basées sur les antennes spirales, les antennes fractales, les antennes transparentes ont également été présentées. Nous avons également présenté l'influence du véhicule sur les performances des antennes.

Ceci nous a conduit à examiner quelques contributions où le véhicule lui-même contribue au rayonnement. Cette voie nous semblant relativement peu étudiée, nous avons orienté notre travail sur ce principe de véhicule rayonnant appelé également "car-antenna". Ce concept sera étudié dans un premier temps par le biais de formes simples [77] avant son application sur des véhicules réels.

Chapitre 3

Etude du comportement radioélectrique de structures métalliques simples

3.1 Introduction

Comme indiqué dans le bilan de l'état de l'art, les travaux menés durant notre projet sont focalisés sur le concept "car-antenna". Celui-ci consiste à faire rayonner la structure métallique du véhicule. Il permettra ainsi de substituer une partie des antennes présentes sur le véhicule par la structure (du véhicule) elle-même susceptible d'émettre ou de recevoir des signaux radioélectriques sur une large gamme de fréquences. On note cependant qu'à la demande de PSA Peugeot Citroën, nous nous focaliserons principalement sur la réception de signaux FM. Du fait de la complexité de la géométrie d'un véhicule automobile, notre analyse se fait suivant plusieurs étapes dont la première consiste à faire des tests préliminaires afin de s'assurer du rayonnement de la structure métallique. Dans un second temps, nous analysons des formes canoniques qui nous aideront à la compréhension du principe de rayonnement d'un véhicule avant de terminer par un modèle de véhicule simplifié à l'échelle $\frac{1}{2}$.

3.2 Tests préliminaires : Mise en évidence du rayonnement de la structure du véhicule

Dans cette partie, nous présentons très succinctement quelques résultats préliminaires montrant l'influence du véhicule dans la bonne réception de signaux AM, DVB, GPS ou même DCS. Dans la première phase de notre étude, nous avons procédé à une identification des zones disponibles du véhicule pour "héberger" une antenne. Elles correspondent à celles qui sont plus favorables à une émission et/ou une réception d'ondes électromagnétiques. Pour cela, un récepteur GPS (portable) muni de sa propre antenne est placé à différents endroits à l'intérieur d'une Citroën Xsara Picasso.

Pour chaque position, nous avons relevé le nombre de satellites reçus. Ces différents résultats sont ensuite comparés à une référence (réception en dehors du véhicule). La variation du nombre de satellites reçus en fonction de la position du GPS dans le véhicule a permis de conclure que la position de l'antenne dans le véhicule modifie les performances à la réception. On passe de 2 satellites reçus à 7 satellites selon la localisation du récepteur dans le véhicule. Par contre, la comparaison des résultats obtenus lorsque le GPS est à l'intérieur du véhicule à ceux obtenus lorsque celui-ci est en espace libre (7 satellites reçus) nous a renseigné sur l'influence du véhicule sur les performances du récepteur. Dans cette expérience, nous avons constaté l'interaction qui existe entre l'antenne d'un récepteur (placé à l'intérieur d'un véhicule) et la structure métallique du véhicule.

Suite à cette constatation et vu la taille importante de la structure du véhicule, nous avons agi de manière plus radicale en tentant, cette fois de prélever des signaux radioélectriques en utilisant directement le véhicule comme antenne. Pour ce faire, nous branchons directement l'âme d'un câble coaxial au véhicule. L'autre extrémité du câble est reliée à un analyseur de spectre. La figure 3.1 montre un exemple de branchement pour lequel des signaux AM sont reçus.

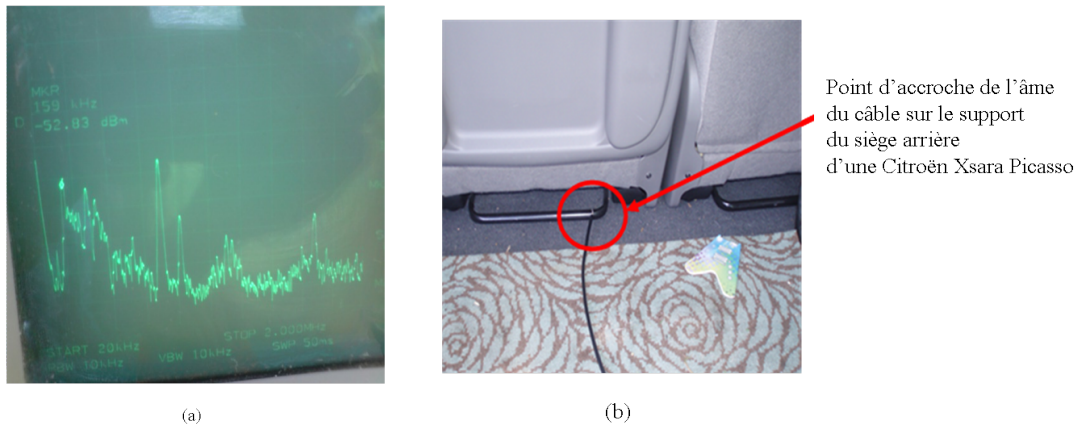


FIGURE 3.1 – Spectre des signaux AM suite à un accrochage de l'âme d'un câble coaxial sur le siège arrière d'une Citroën Xsara Picasso (a) et localisation du point d'accrochage (b)

On précise que la qualité du câble est suffisante pour rejeter l'hypothèse d'une réception possible avec celui-ci. La figure 3.1a montre un niveau de signal se situant environ 17dB au dessus du bruit. Ce rapport signal à bruit confirme la contribution de la structure du véhicule dans la réception de signaux AM. Sur le même principe, nous avons pu intercepter des signaux pour ouverture à distance des portes, des signaux DVB et DCS. Sur la figure 3.2, on montre un exemple où des signaux DVB-H et DCS sont reçus.

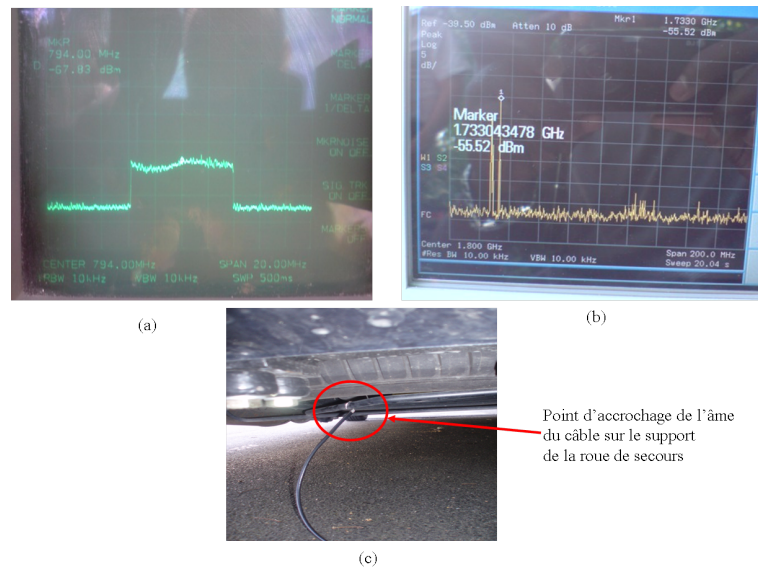


FIGURE 3.2 – Spectre des signaux DVB-H (a) et DCS (b) suite à un accrochage de l'âme d'un câble coaxial sur le support de la roue de secours d'une Ford Mondeo et localisation du point d'accrochage (c)

D'autres essais ont été effectués à l'aide d'un récepteur GPS dépourvu de son antenne d'origine. En statique comme en roulage, une réception confortable de signaux GPS a été mise en évidence comme le montre la figure 3.3.

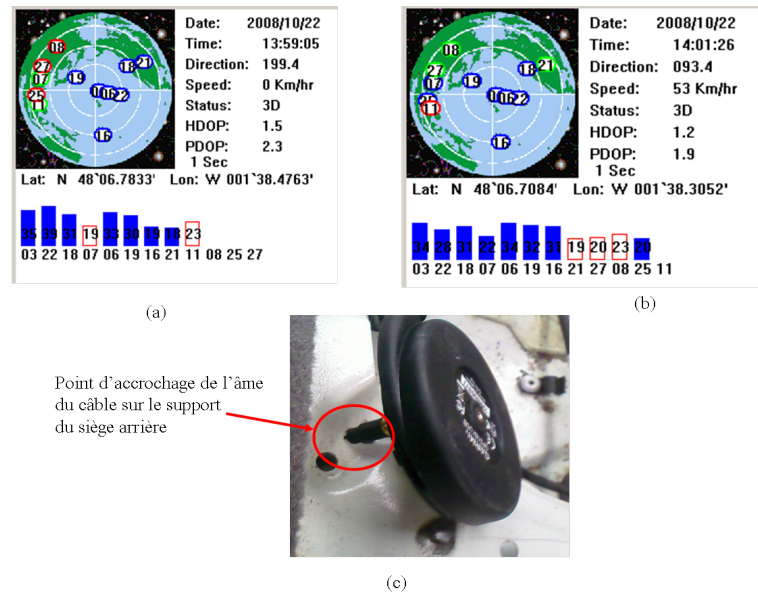


FIGURE 3.3 – Représentation du nombre de satellites GPS reçus en statique (a) et en mobilité (b) suite à un accrochage de l'âme d'un câble coaxial sur le support du siège arrière d'une Ford Mondeo et localisation du point d'accrochage (c)

La figure 3.3 montre qu'avec ce principe, des signaux GPS peuvent être reçus. Des tests ont également été faits dans la bande FM et les résultats montrent que le principe permet de recevoir des signaux dans cette bande.

Pour palier ces problèmes, une mise à la masse de la gaine est obligatoire (DC-grounded). Il s'agit de relier la gaine du câble coaxial à la masse commune de tous les appareils électriques contenus dans un véhicule. L'âme étant déjà reliée à cette masse (qui se trouve être le châssis du véhicule), un accrochage direct de la gaine entraînerait un court-circuit. Pour ce faire, on insère une self de choc entre l'extrémité de la gaine et le châssis du véhicule. Cette inductance est optimisée de façon à avoir, au point de contact avec le châssis, un circuit ouvert en HF tout en laissant passer le continu (DC). Cette originalité est protégée par un brevet [78]. Plusieurs technologies permettent la réalisation de la self selon la bande de fréquence. La figure 3.4 en montre quelques exemples.

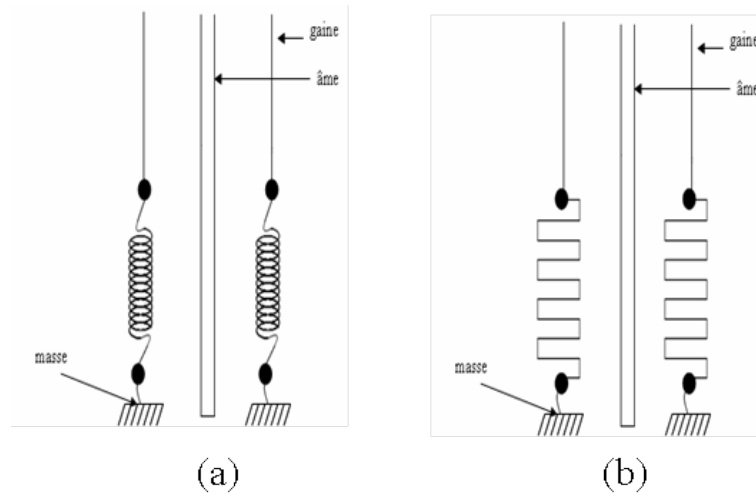


FIGURE 3.4 – Exemple de réalisation de bobines d'arrêt pour empêcher le passage des courants HF sur la gaine du câble coaxial : cas d'un bobinage (a) et de l'utilisation de la technologie microruban (b)

La figure 3.4a montre une réalisation faite grâce à un bobinage tandis que sur la figure 3.4b, la self est réalisée avec une ligne microruban méandrée. Les tests menés avec l'ajout de la self de choc (DC-grounded) donnent les mêmes résultats que ceux menés avec la gaine flottante.

3.3 Application du concept car-antenna à des formes canoniques (théorie et mesure)

3.3.1 Introduction

Fort de ces premiers tests, nous avons démarré une étude théorique sur des formes canoniques simples (parallélépipède). L'objectif est de travailler avec des modèles de petites dimensions sollicitant peu de ressources informatiques mais surtout de comprendre le processus de rayonnement d'une structure métallique placée au dessus d'un plan de sol.

L'analyse de ces formes canoniques aboutira au choix de points caractéristiques de la structure métallique susceptibles de devenir les points d'excitation de la structure rayonnante. Pour déterminer ces points, on examine, dans un premier temps, la répartition des courants surfaciques sur la structure métallique lorsque celle-ci est éclairée par une onde plane. Dans un second temps, nous identifions les zones où les courants sont forts et pratiquement invariants dans le but de déterminer les futurs points d'excitation de structures rayonnantes. L'objectif ultime étant de déterminer la localisation du point d'excitation qui permettrait à la structure rayonnante de générer des diagrammes de rayonnement ayant le moins d'ondulations possibles dans le plan azimutal. Cette étude est complétée par une analyse des impédances d'entrée de la structure en ces points d'excitation.

Les dimensions de la première structure étudiée (parallélépipède de 15x7.5x6cm) sont de manière très grossière voisines d'une Citroën C2 divisée par 20. Comme il a été précisé plus haut, à la demande de PSA Peugeot Citroën, nous focalisons notre étude sur la bande FM française. On en déduit alors aisément que si l'on veut respecter le rapport des échelles du parallélépipède et d'une C2, la bande de fréquence où doit se faire l'analyse du parallélépipède sera voisine de 2GHz au lieu de 100MHz.

3.3.2 Outils de simulation

Pour ce travail, nous utilisons plusieurs logiciels d'analyse électromagnétique dont Microwave Studio de CST (Computer Simulation Technology, en anglais). Celui-ci utilise la méthode des intégrales finies (Finite Integration Technique FIT) proposée par Weiland en 1977. Elle consiste à discrétiser spatialement les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Le maillage généré est donc volumique et la cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles temporelles par des différentielles. Nous avons choisi ce logiciel car l'utilisation d'un outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageux en terme de temps de calcul pour la simulation de structures large bande.

Néanmoins, pour certaines structures complexes, nous utilisons également FEKO. C'est un outil de simulation basé, par défaut, sur la méthode des moments (MoM). Dans certains cas, FEKO peut tenir compte de l'échantillonnage des fréquences grâce à l'utilisation de la théorie uniforme de la diffraction et de l'optique physique. Cette hybridation permet l'étude de larges problèmes en terme de longueur d'onde. La mise en œuvre et la validation de l'approche hybride de calcul fournit de nombreux avantages pour différents types de problèmes électromagnétiques tels que la modélisation des structures de type automobile. Son interface très développée et son outil de CAO constituent des atouts majeurs. De plus, les effets du sol sont mieux considérés que dans un logiciel tel que CST.

3.3.3 Examen de la répartition des courants surfaciques du parallélépipède illuminé par une onde plane

Comme indiqué précédemment, nous étudions dans un premier temps une boîte fermée en forme parallélépipédique décrit sur la figure 3.5.

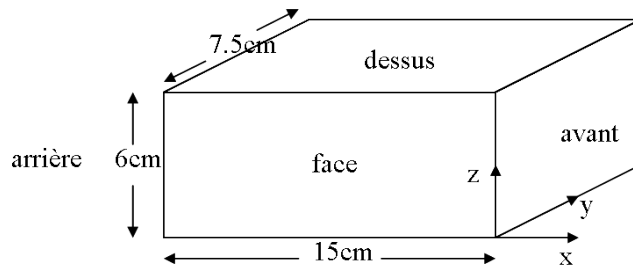


FIGURE 3.5 – Dimensions du parallélépipède devant être illuminé par les ondes planes

Ce parallélépipède vide et fermé est illuminé par une onde plane selon 3 incidences.

- Onde plane venant de l'arrière du parallélépipède
- Onde plane venant de l'avant du parallélépipède
- Onde plane venant d'un des côtés du parallélépipède

Du fait de la symétrie du parallélépipède, nous ne représentons que la répartition des courants lorsque ce dernier est éclairé par une onde plane venant de l'avant ou d'un de ses côtés. Le repère utilisé est représenté sur la figure 3.6.

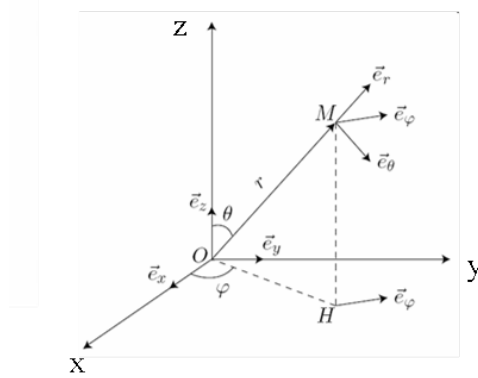
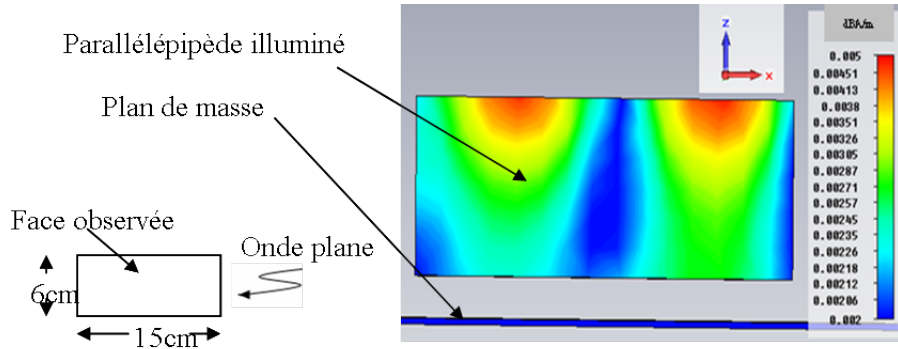


FIGURE 3.6 – Rappel du repère utilisé

Les illuminations du parallélépipède ont été faites en présence d'un plan de masse parfaitement conducteur ($42 \times 42 \times 0.2 \text{ cm}$). La figure 3.7 montre la répartition des courants surfaciques sur le parallélépipède lorsque celui-ci est illuminé par une onde plane venant de l'avant. Autrement dit, l'onde incidente provient de la direction ($\theta=90^\circ$; $\phi=0^\circ$).

FIGURE 3.7 – Répartition des courants surfaciques sur la face du parallélépipède illuminé par une onde plane venant de l'avant (vue de face; $\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$)

Cette répartition montre des minima de courant sur les bords et le milieu du parallélépipède. Par contre, des maxima de courant sont observés sur le premier et l'avant dernier quart du parallélépipède. Cela correspond à une variation sinusoïdale des courants sur une période spatiale entière.

La figure 3.8 montre la répartition des courants lorsque le parallélépipède est illuminé par une onde plane venant d'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$).

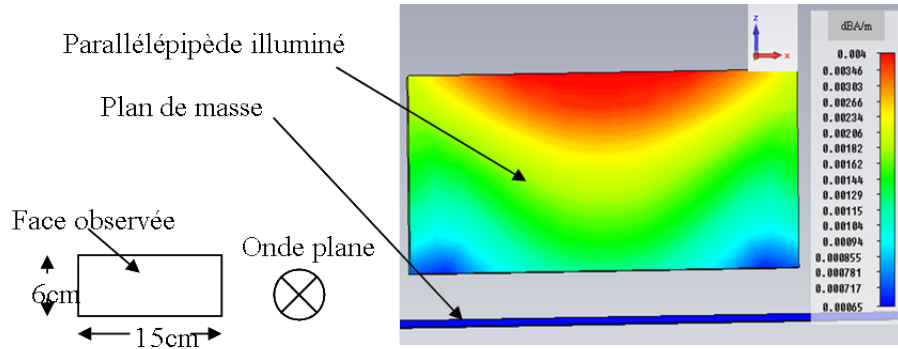


FIGURE 3.8 – Répartition des courants surfaciques sur la face du parallélépipède illuminé par une onde plane venant du côté (vue de face ; $\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

Contrairement à la répartition des courants lorsque l'onde plane arrive par l'avant, sur la figure 3.8, seulement une demi-période spatiale apparaît. Cette répartition est liée aux dimensions du parallélépipède ($15 \times 7.5 \times 6 \text{ cm}$). A cette fréquence, la longueur d'onde (λ) est de 0.15 m et ceci correspond à la longueur du parallélépipède. De ce fait, quand le parallélépipède est illuminé suivant sa longueur (onde plane venant de l'avant ou de l'arrière), nous avons un courant qui varie comme une sinusoïde sur une période. Par contre, si l'illumination est faite suivant la largeur du parallélépipède (onde plane venant du côté), le courant n'aura le temps que de parcourir une demi-période spatiale car la largeur est de $\frac{\lambda}{2}$.

Pour évaluer la contribution de chaque composante de courant, nous avons analysé la répartition des courants (I_x , I_y , I_z) suivant les différentes directions (x, y, z). La figure 3.9 montre les variations de chaque composante du courant.

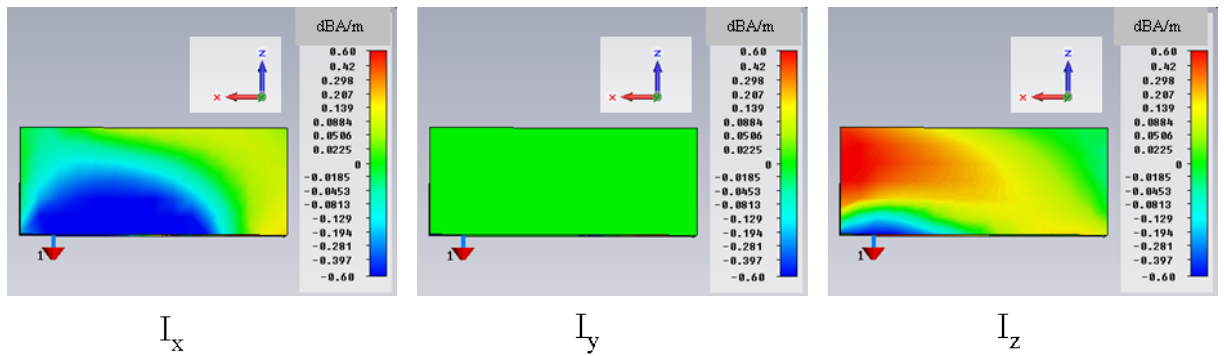


FIGURE 3.9 – Répartition des composantes (I_x , I_y , I_z) de courant surfacique du parallélépipède illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) ; vue de face ($\theta=90^\circ$ et $\phi=-90^\circ$)

Cette répartition montre que la composante I_z est prépondérante par rapport à I_x et I_y . Du fait de la présence du plan de masse, les contributions horizontales des cou-

rants I_x et I_y s'auto-détruisent tandis que les contributions verticales I_z s'additionnent (théorie des images). Ceci explique la répartition de courants observée.

3.3.4 Examen de la répartition des courants surfaciques d'un véhicule à dimensions réduites illuminé par une onde plane

A la lumière des résultats du paragraphe précédent, nous proposons de poursuivre cette étude sur une structure proche d'un véhicule de type C2 à l'échelle $\frac{1}{2}$. Les dimensions (en mm) de cette structure (que nous appelons mini-car) sont représentées sur la figure 3.10. Le repère utilisé est le même que celui présenté dans la figure 3.6.

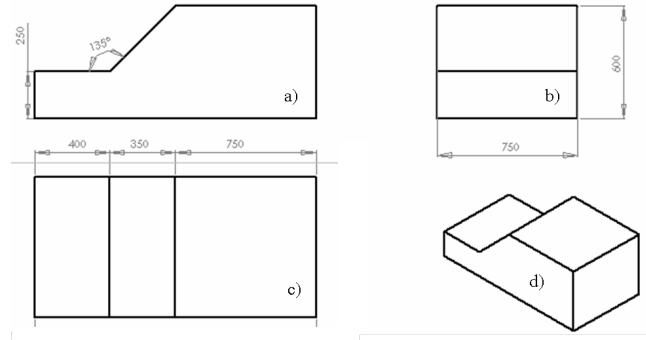


FIGURE 3.10 – Dimensions du véhicule voisines de celles d'une C2 à l'échelle $\frac{1}{2}$; (a) : vue de côté, (b) : vue de l'avant, (c) : vue de dessus et (d) : vue de profil

L'objet étudié (figure 3.10) est une réduction d'un facteur 2 assez grossière des principales dimensions d'une C2. Conformément à ce qui a déjà été expliqué pour le parallélépipède et pour rester en phase avec la priorité de la bande FM, le rapport des dimensions est également observé sur les fréquences étudiées. L'étude sera donc menée à 200MHz. Comme dans le cas du parallélépipède, le mini-car est illuminé par une onde plane afin d'analyser les courants surfaciques ainsi générés. Pour une onde arrivant de l'avant du mini-car ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$), nous obtenons la distribution des courants surfaciques représentée sur la figure 3.11.

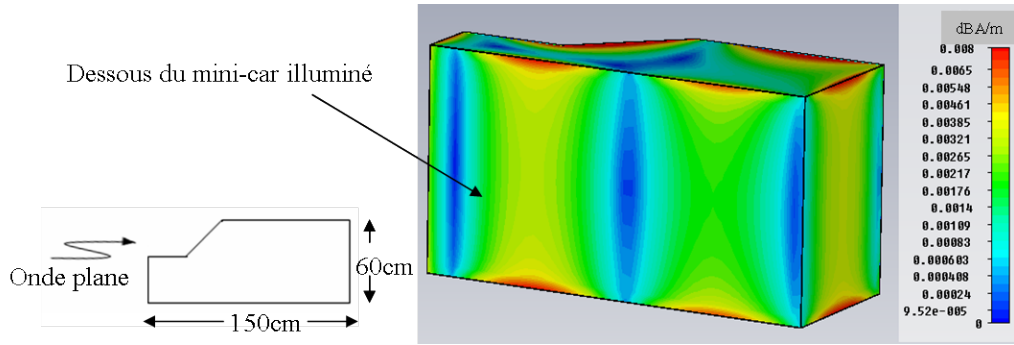


FIGURE 3.11 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

La cartographie correspond, dans ce cas, à une variation sinusoïdale sur une période égale à la longueur d'onde λ (à 200MHz). En fait, comme dans le cas du parallélépipède, la longueur du mini-car correspond à λ .

Nous avons également illuminé le mini-car par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$ et $\phi=180^\circ$). La cartographie correspondante est identique à celle représentée sur la figure 3.11. On note juste une différence de phase liée à la direction d'arrivée de l'onde plane. En fait, lorsque le mini-car est illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$), cette dernière parcourt la face de dessous en suivant sa longueur. De même, lorsqu'il est illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$ et $\phi=180^\circ$), le parcours se fait sur la longueur. Par contre, si l'onde plane arrive par le côté, nous obtenons la cartographie de la figure 3.12.

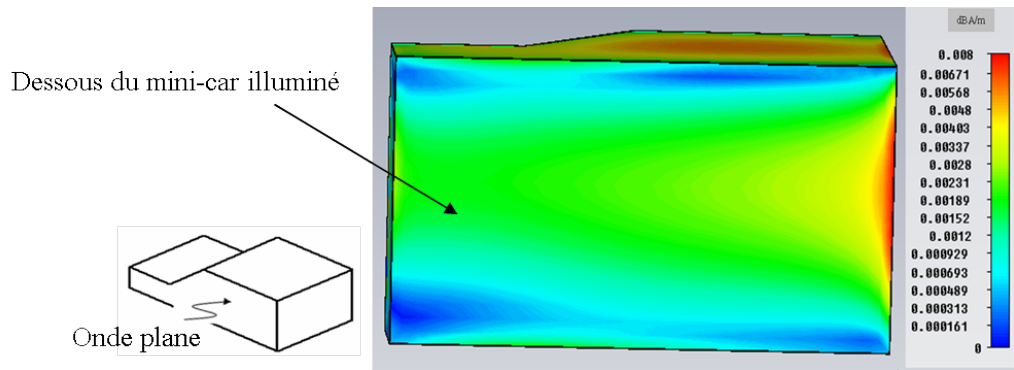


FIGURE 3.12 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; $\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

La figure 3.12 montre également un courant variant sur une demi-période spatiale (suivant la largeur du mini-car) comme dans le cas du parallélépipède. Cela est dû au fait que l'illumination est faite suivant la largeur du mini-car (elle est de 0.75m ;

ce qui est de l'ordre de $\frac{\lambda}{2}$). Nous rappelons que ce modèle est fermé ; autrement dit, l'influence de la partie vitrée du véhicule n'est pas prise en compte.

Nous avons donc, par la suite, introduit des ouvertures sur ce modèle de mini-car avant de l'illuminer selon le même principe que celui utilisé pour le mini-car "fermé". La figure 3.13 montre la description des courants surfaciques suite à une illumination par une onde plane venant de l'avant du mini-car.

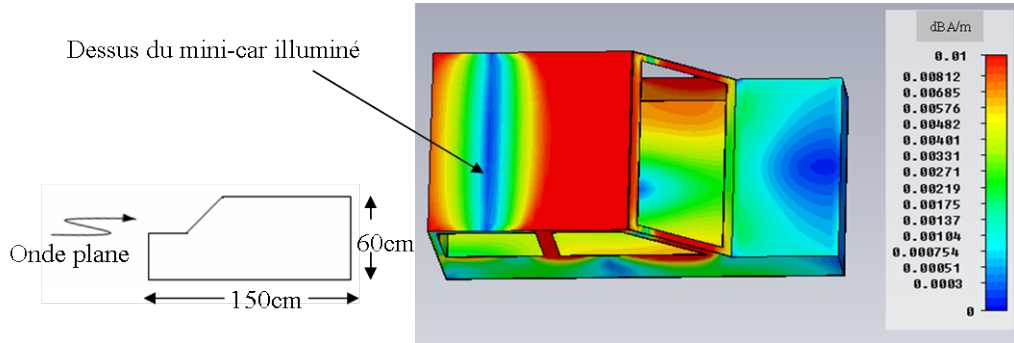


FIGURE 3.13 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car avec ouvertures illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessus ; $\theta=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

Nous retrouvons les mêmes variations de courant observées à la fois dans l'analyse du parallélépipède et du mini-car fermé. Par contre, autour des ouvertures, nous observons des courants très forts. Ces courants sont probablement dus aux phénomènes de diffraction ou aux discontinuités occasionnées par les ruptures brusques de géométrie. Pour une onde plane venant d'un des côtés, la cartographie correspondante est représentée sur la figure 3.14.

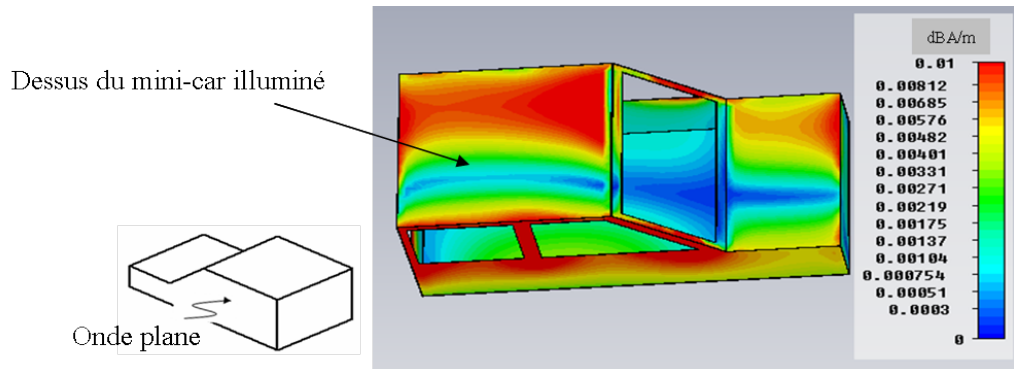


FIGURE 3.14 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car avec ouvertures illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 200MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessus ; $\theta=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

Nous relevons des répartitions de courant similaires aux cas précédemment étudiés. Par contre, les niveaux de courant sont plus élevés (particulièrement aux alentours des ouvertures). Les ondes venant de l'avant ou de l'arrière du mini-car (avec ou sans ouvertures) présentent la même description du courant. Nous précisons que dans le cas du mini-car muni d'ouvertures, la vue de dessous est volontairement représentée pour visualiser les maximum de courants aux alentours des ruptures.

A partir de ces cartographies, nous allons définir les zones du mini-car propices pour favoriser le rayonnement de la structure. Une zone est jugée favorable pour devenir une zone d'excitation à partir du moment où les variations de courant y sont modérées mais surtout que le courant n'y est ni au maximum ni au minimum. Le raisonnement se base sur le mini-car muni d'ouvertures.

Dans ce cas, d'après les cartographies obtenues suite à l'illumination par une onde plane venant de l'avant ou de l'arrière, un maximum de courant est obtenu à $\frac{\lambda}{4}$ et à $\frac{3\lambda}{4}$. Un point d'excitation à cet endroit aurait une impédance très faible ne favorisant pas le gain du diagramme de rayonnement du mini-car. Sur ces mêmes cartographies (onde plane venant de l'avant ou de l'arrière), nous observons des nuls de courant à 0, $\frac{\lambda}{2}$ et à λ . Dans ces zones, l'impédance est presque infinie, ce qui ne favorise également pas le rayonnement. De ce fait, pour avoir un rayonnement ayant un comportement favorable à la réception (ou à l'émission), il sera plus judicieux de prendre des zones se situant soit à $\frac{\lambda}{8}$, à $\frac{3\lambda}{8}$, à $\frac{5\lambda}{8}$ ou à $\frac{7\lambda}{8}$ car à ces endroits, le courant n'est ni trop fort ni trop faible. La figure 3.15 montre les zones jugées favorables à un rayonnement de la structure (vue de dessous) lorsque le mini-car est illuminé par une onde plane venant soit de l'avant ou de l'arrière.

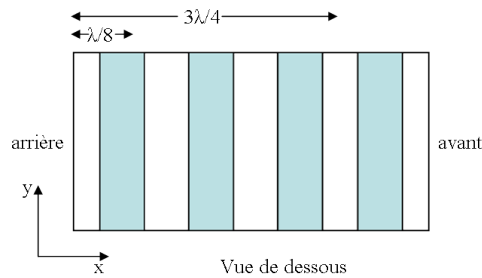


FIGURE 3.15 – Vue de dessous du mini-car et les zones où le courant varie peu suite à l'illumination par une onde plane venant de l'avant ou de l'arrière du mini-car

Par contre, pour une illumination par une onde plane venant d'un des côtés, la zone optimale serait autour de $\frac{\lambda}{8}$ ou à $\frac{3\lambda}{8}$. La figure 3.16 montre les zones identifiées à la suite de l'illumination du mini-car par une onde plane venant de l'un de ses côtés.

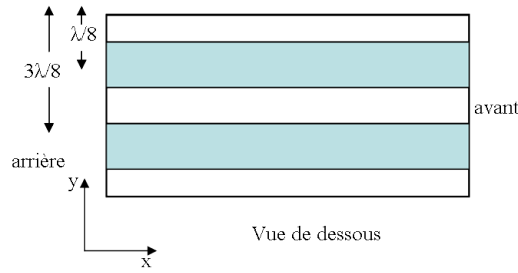


FIGURE 3.16 – Vue de dessous du mini-car et les zones où le courant varie peu suite à l'illumination par une onde plane venant de l'un des côtés du mini-car

De ce fait, finalement, les zones optimales correspondent à l'intersection des zones identifiées lorsque l'onde plane arrive par l'avant (ou l'arrière) et celles identifiées lorsque l'onde plane arrive par l'un des côtés. La figure 3.17 montre une vue de dessous du mini-car avec les zones identifiées.

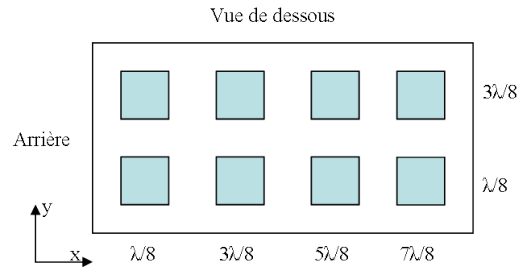


FIGURE 3.17 – Vue de dessous du mini-car et zones pour lesquelles la variation du courant est favorable pour devenir une zone d'excitation du mini-car à 200MHz

Du fait de la réciprocité des antennes passives, une excitation en un point se situant dans une zone favorable devrait induire une distribution de courant identique à la distribution de courant induite lorsque le mini-car est illuminé par une onde plane.

Notons également que le choix de ces zones s'est fait à partir d'un raisonnement basé sur le dessous du mini-car. Cette même étude menée sur les autres parties du mini-car permettrait de déterminer des zones pour lesquelles le diagramme de rayonnement serait favorable à une réception (ou une émission). La difficulté pour ces autres parties du mini-car réside dans l'interprétation des résultats issus de l'illumination du mini-car par une onde plane du fait de la complexité des géométries dans ces endroits.

Une étude de ce type a également été menée à d'autres fréquences comme par exemple 315MHz (ici 630MHz du fait de la réduction à l'échelle $\frac{1}{2}$). Cette fréquence est utilisée pour la fermeture automatique des portes des véhicules en dehors de la zone Europe (Japon par exemple). Elle est aussi utilisée dans les systèmes de contrôle de pression des pneumatiques. L'analyse a également été faite à 433MHz (ici à 866MHz du fait de la réduction à l'échelle $\frac{1}{2}$). C'est une fréquence utilisée dans les systèmes

d'ouverture des portes des véhicules en Europe. La fréquence GPS ainsi que l'UMTS ont également été étudiées. Les distributions de courants obtenues sont consignées dans l'annexe A. Rappelons que tous les calculs présentés dans l'annexe ont été réalisés en présence d'un plan de sol réel (sol moyennement sec : $\sigma=2.10^{-3}\text{S/m}$; $\epsilon=15$). Des analyses sont également faites en espace libre mais la seule différence reste les pertes introduites par le plan de sol. Ces pertes varient en fonction de la fréquence mais également en fonction de la direction d'arrivée de l'onde plane. Les distributions de courant sur le mini-car en absence de plan de sol sont présentées dans l'annexe B.

L'étude présentée dans ce paragraphe est basée sur trois directions particulières d'illumination avec des ondes planes (onde plane venant de l'avant, de l'arrière ou du côté) avec des incidences rasantes ($\theta=90^\circ$). Bien qu'étant un choix arbitraire, l'illumination du mini-car par ces ondes planes de directions différentes a permis d'examiner le comportement de la distribution du courant en fonction de la direction d'incidence de la source et d'identifier des zones pour lesquelles le rayonnement d'un parallélépipède ou d'un mini-car est a priori favorable pour de la réception (ou de l'émission) de signaux radioélectriques. Pour le vérifier, nous allons calculer le diagramme de rayonnement ainsi que l'impédance en excitant le véhicule grâce à une sonde coaxiale en un point se situant dans une zone jugée favorable.

3.3.5 Détermination des diagrammes de rayonnement et des impédances d'entrée pour différents points d'excitation

Dans cette partie, nous allons vérifier les hypothèses posées précédemment par le biais de simulations mettant en œuvre un câble coaxial pour exciter la structure. Nous analysons d'une part le parallélépipède et d'autre part le mini-car. Notre étude sera faite pour des points d'excitation se situant sur les parties inférieures du parallélépipède et du mini-car (avec et sans ouverture).

3.3.5.1 Diagrammes de rayonnement théoriques du parallélépipède

Dans un premier temps, nous calculons le diagramme de rayonnement théorique du parallélépipède pour un point choisi dans les zones favorables. La figure 3.18 montre le diagramme de rayonnement du parallélépipède en azimuth à 2GHz pour un point d'accès donné ($P1$). La composante E_θ du champ électromagnétique représentée.

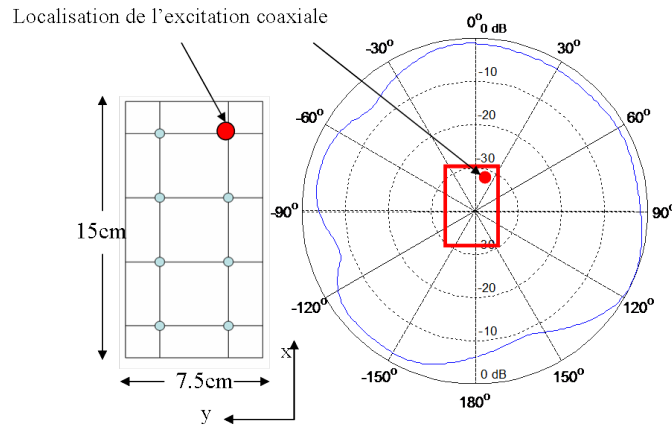


FIGURE 3.18 – Diagramme de rayonnement (E_θ) théorique normalisé à $\theta = 90^\circ$ du parallélépipède à 2GHz; Branchement au point $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$) pour une vue de dessous

Le diagramme de rayonnement est normalisé par rapport au gain maximal du parallélépipède qui est de 0.7dBi et présente des ondulations pouvant aller jusqu'à 9dB. On remarque également que le diagramme est orienté dans la direction où se situe le point d'alimentation. Ce point est particulièrement intéressant et nous reviendrons dessus dans la suite de ce document.

Si l'on observe la distribution des courants sur le parallélépipède (figures 3.7 et 3.8), on peut apporter une interprétation à la présence de trous dans le diagramme azimutal. La figure 3.19 montre une vue du dessous du parallélépipède avec les secteurs angulaires marquant les endroits où le diagramme de rayonnement présente des trous.

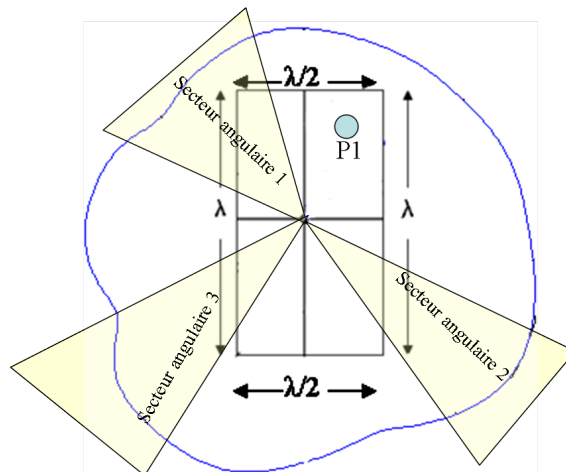


FIGURE 3.19 – Vue de dessous du parallélépipède avec la position du point d'accès et des secteurs angulaires où le diagramme présente des variations remarquables de son niveau

Les secteurs 1 et 3 correspondent à des secteurs angulaires où des creux de rayonnement sont présents. En fait, en ces endroits, les courants présentent des phases différentes. Par exemple, dans le secteur 3, une partie du courant a fait un parcours d'environ 2λ tandis qu'une autre partie en a fait que λ (le point de départ étant le point d'excitation). Cette différence de chemin parcouru (donc de la phase) donne lieu à une combinaison destructive des courants ; ce qui justifie les trous observés. Par contre, dans le deuxième secteur angulaire, nous avons un maximum de rayonnement proche de la valeur maximale. En fait, à cet endroit, les courants sont en phase (ils ont parcouru la même distance) ; de ce fait, leur addition est constructive. En fait, les combinaisons sont constructives lorsque les courants sont en phase (lorsqu'ils ont parcouru la même distance).

Sur la figure 3.20, nous présentons un diagramme de rayonnement obtenu lorsque le point d'accès est au point $P2$. Comme dans le cas de l'étude de $P1$, c'est la composante E_θ du champ qui est représentée.

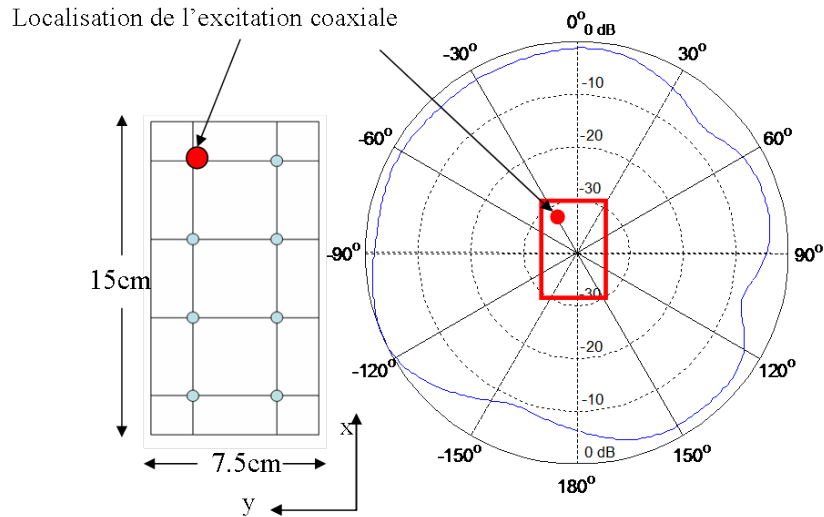


FIGURE 3.20 – Diagramme de rayonnement (E_θ) théorique normalisé à $\theta = 90^\circ$ du parallélépipède à 2GHz ; Branchement au point $P2$ ($x = 131.5mm$; $y = 56.25mm$) ; vue de dessous

A une rotation près, le diagramme de rayonnement obtenu conserve les mêmes caractéristiques que celles obtenues lors du branchement au point $P1$. La réorientation du diagramme est simplement due au changement de localisation du point d'excitation.

Nous avons souligné dans la partie concernant l'illumination que la composante suivant l'axe (Oz) du courant était majoritairement responsable du rayonnement. Dans la partie qui suit, nous nous proposons de le vérifier en introduisant des ouvertures sur le parallélépipède comme le montre la figure 3.21.

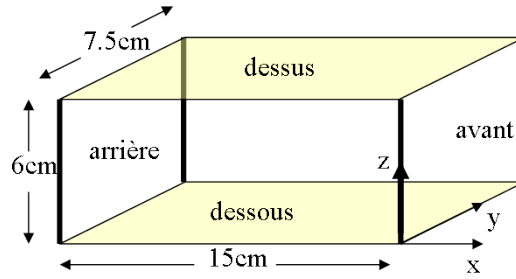


FIGURE 3.21 – Schéma du parallélépipède avec les ouvertures

On compare le diagramme théorique résultant de l'excitation du parallélépipède muni d'ouvertures avec celui du parallélépipède sans ouverture (figure 3.22) pour une excitation au point $P1$ à 2GHz.

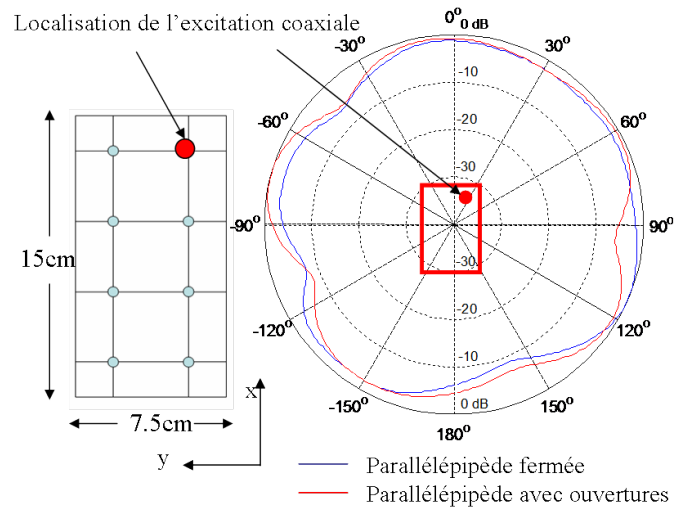


FIGURE 3.22 – Comparaison des diagrammes de rayonnement (E_θ) théoriques normalisés à $\theta = 90^\circ$ des parallélépipèdes ouvert et fermé pour un point d'excitation $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$)

La figure 3.22 montre que les diagrammes théoriques des deux parallélépipèdes sont très voisins. Cela conforte les conclusions faites lors de l'analyse des distributions des courants suite à l'illumination par une onde plane qui ont montré que les courants étaient très majoritairement orientés selon l'axe Oz .

3.3.5.2 Diagrammes de rayonnement théoriques du mini-car

Dans ce paragraphe, nous comparons les diagrammes de rayonnement du mini-car fermé et du mini-car muni d'ouvertures. Sur la figure 3.23, on montre le diagramme de rayonnement du mini-car fermé lorsqu'il est alimenté au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) par une sonde coaxiale à 200MHz.

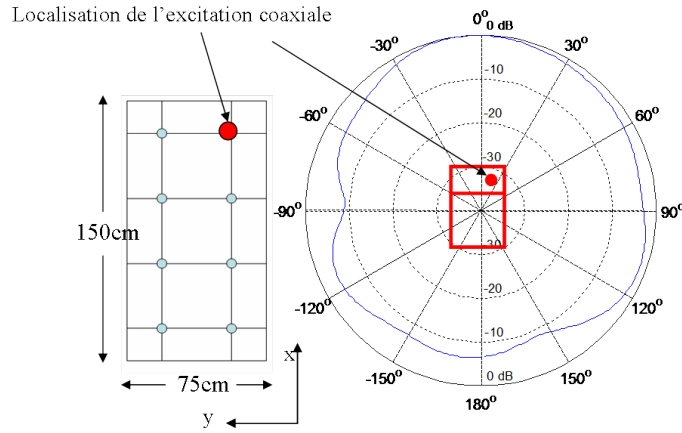


FIGURE 3.23 – Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisé par rapport au gain max à $\theta = 90^\circ$ du mini-car à 200MHz ; Branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) ; vue de dessous

Le diagramme est normalisé par rapport au gain maximal (environ 7dBi). Les ondulations du diagramme peuvent aller jusqu'à 8dB. Elles sont localisées dans des secteurs angulaires où la combinaison des contributions de courant est destructive (par exemple dans la partie arrière du véhicule). Nous avons ensuite tracé le diagramme de rayonnement pour un autre point $P2$. La figure 3.24 montre le diagramme obtenu.

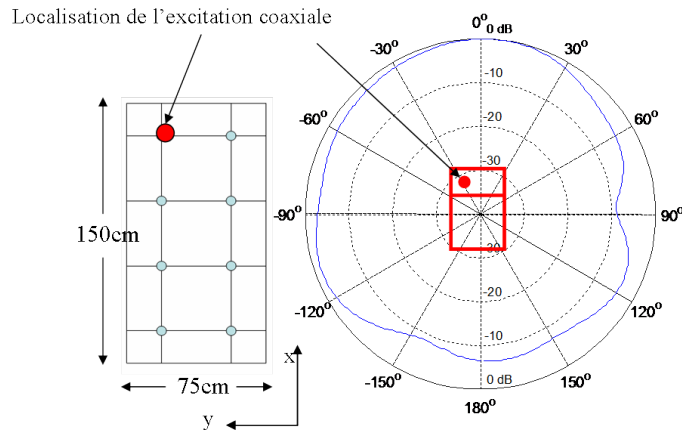


FIGURE 3.24 – Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisé à $\theta = 90^\circ$ du mini-car fermé à 200MHz ; Branchement au point $P2$ ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$) ; vue de dessous

Les observations faites sur la figure 3.23 concernant la forme et les ondulations du diagramme de rayonnement restent valables. Comme dans le cas du parallélépipède, l'orientation du diagramme de rayonnement varie en fonction du point d'excitation.

Par la suite, pour se placer dans un cas plus concret, nous avons examiné le mini-car avec des ouvertures. La figure 3.25 montre le diagramme de rayonnement obtenu

suite à une alimentation au point P1 (identique à celui utilisé dans le cas du mini-car fermé).

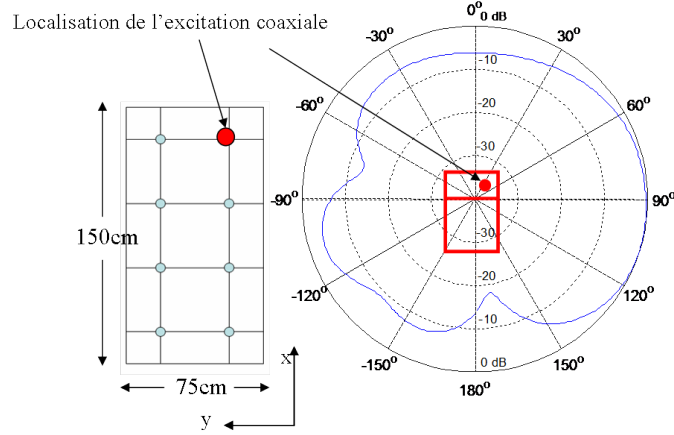


FIGURE 3.25 – Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisé à $\theta = 90^\circ$ du mini-car avec des ouvertures à 200MHz; Branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$); vue de dessous

Le diagramme de rayonnement est normalisé par rapport au gain maximal de 8.2dBi. Comme dans le cas du mini-car fermé, nous avons un diagramme orienté vers le point d'excitation. Les ondulations peuvent, cette fois, aller jusqu'à 18dB. Cela est probablement dû aux différentes diffractions apportées par les ruptures de la géométrie (ouvertures).

Sur la figure 3.26, on montre le diagramme obtenu lorsque le mini-car muni d'ouvertures est alimenté au point $P2$.

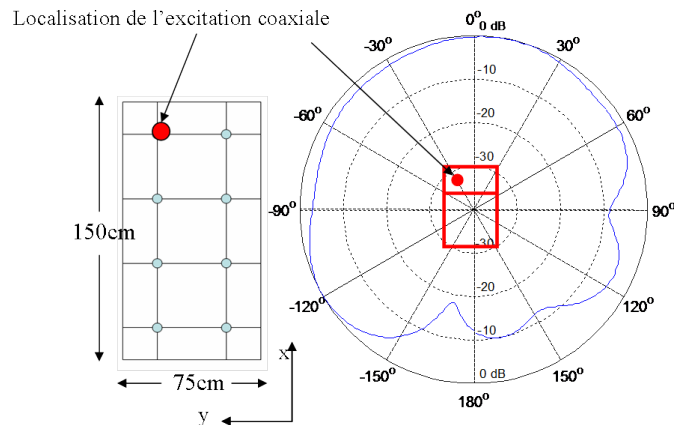


FIGURE 3.26 – Diagramme de rayonnement théorique (E_θ) normalisée à $\theta = 90^\circ$ du mini-car avec des ouvertures à 200MHz; Branchement au point $P2$ ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$); vue de dessous

Mis à part la rotation du diagramme de rayonnement en fonction de la position du point d'accès, nous observons les mêmes caractéristiques que celles obtenues avec une excitation au point $P1$.

L'étude théorique des diagrammes de rayonnement est complétée par le calcul des impédances théoriques du parallélépipède ainsi que du mini-car.

3.3.5.3 Quelques résultats d'impédance théoriques du parallélépipède

Pour calculer les impédances, nous conservons évidemment les points d'excitation choisis pour calculer les diagrammes de rayonnement. Nous présentons l'impédance du parallélépipède ainsi que son coefficient de réflexion. La figure 3.27 montre l'impédance du parallélépipède lorsqu'il est alimenté au point $P1$.

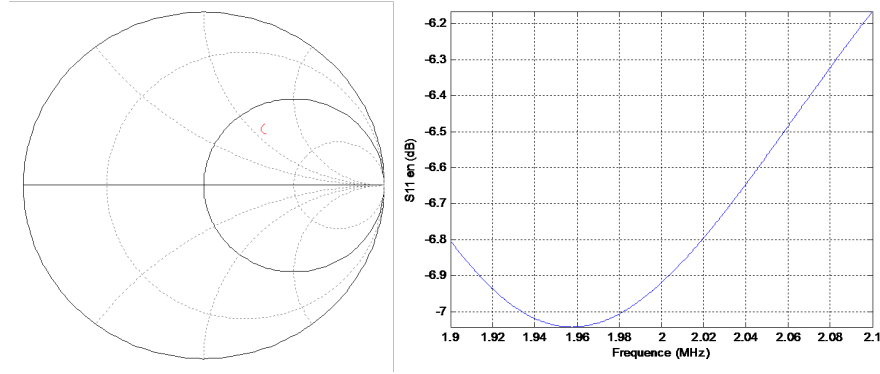


FIGURE 3.27 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion du parallélépipède dans la bande [1.9GHz-2.1GHz]; branchement au point $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 18.75mm$)

La présence de l'impédance à l'intérieur de l'abaque confirme la contribution rayonnante du parallélépipède. Par contre, l'impédance selfique observée souligne un besoin d'améliorer l'adaptation. Les impédances d'autres points d'excitation sont également calculées. Les résultats sont identiques à ceux représentés sur la figure 3.27. Ceci nous semble cohérent puisque les différents points d'excitation correspondent à des valeurs de courant sur le parallélépipède quasi identiques.

3.3.5.4 Présentation de quelques impédances théoriques du mini-car

Nous calculons également l'impédance de rayonnement du mini-car sans ouvertures. La figure 3.28 montre l'impédance ainsi qu'un coefficient de réflexion voisin de $-4dB$ dans la bande [150MHz-250MHz].

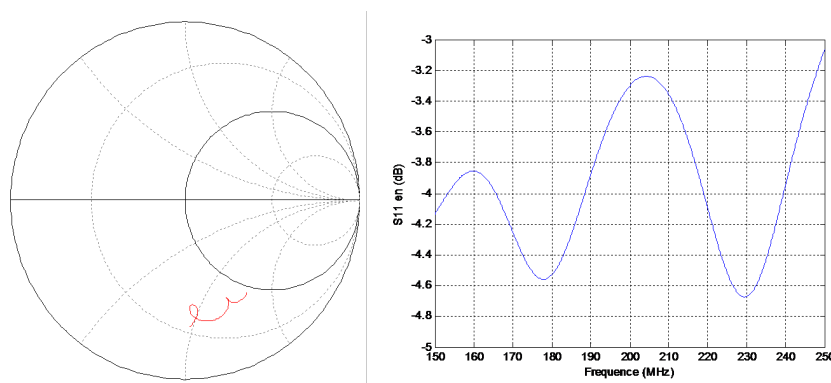


FIGURE 3.28 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion du mini-car fermé dans la bande [150MHz-250MHz] ; branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$)

Contrairement à l'orientation des diagrammes de rayonnement qui varie en fonction de la localisation des points excitateurs, une excitation au point d'accès $P2$ donne la même impédance qu'une excitation au point d'accès $P1$. Nous avons également étudié l'impédance du mini-car à ouvertures et nous observons les mêmes variations que celles obtenus avec le mini-car "fermé".

Nous avons, par la suite, optimisé le coefficient de réflexion du mini-car à ouvertures. Cette adaptation d'impédance est faite en associant un circuit d'adaptation constitué d'une ligne selfique méandree pour atteindre l'axe des réels et d'une ligne quart d'onde pour approcher les 50 Ohms (voir figure 3.29).

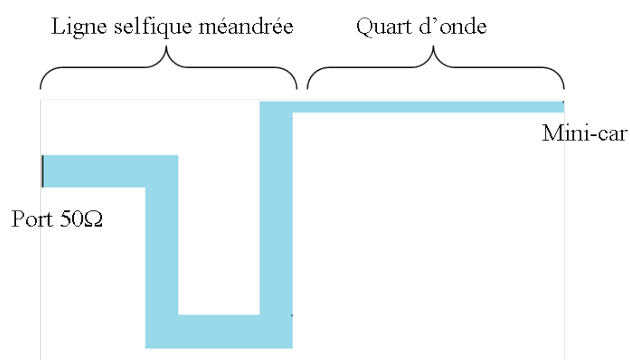


FIGURE 3.29 – Schéma représentatif du circuit d'adaptation utilisé pour optimiser l'impédance du mini-car

La figure 3.30 montre l'impédance du mini-car optimisé par l'insertion de la cellule d'adaptation décrite.

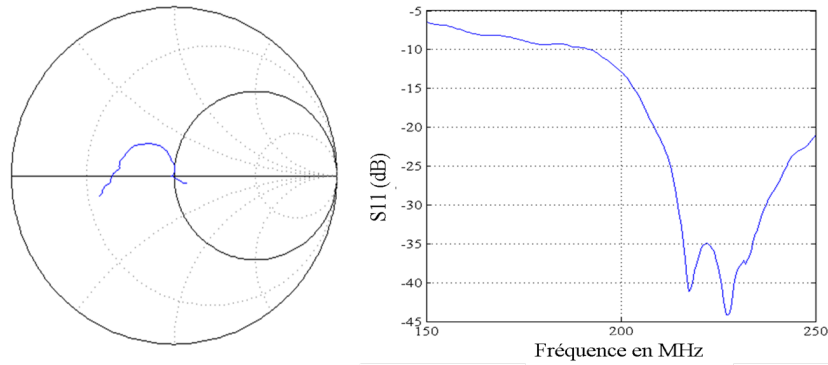


FIGURE 3.30 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion du mini-car fermé théoriques après la cellule d'adaptation dans la bande [150MHz-250MHz] ; branchement au point $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$)

On note une très nette amélioration du coefficient de réflexion entre 180MHz et 250MHz puisque ce dernier devient inférieur à -10dB dans cette bande.

La validation de ces différents calculs théoriques passe par une réalisation puis une mesure des diagrammes de rayonnement et des impédances. Dans la partie suivante, nous présentons les différentes mesures effectuées sur le parallélépipède et sur le mini-car.

3.3.6 Mesure des diagrammes de rayonnement et d'impédances d'entrée

Plusieurs campagnes de mesure ont été effectuées. Les différents diagrammes de rayonnement du parallélépipède ont été mesurés à la base champ proche disponible à l'IETR tandis que ceux du mini-car ont été réalisés chez TDF (la présentation détaillée de cette base de mesure sera faite dans la suite du document).

Dans un premier temps, nous avons mesuré le diagramme de rayonnement du parallélépipède à 2GHz. Le principe de cette mesure consiste à balayer une surface proche du parallélépipède par une sonde de mesure. Enfin, une transformation du champ proche vers le champ lointain est assurée grâce à un algorithme de post-traitement adapté. La figure 3.31 montre une comparaison des diagrammes mesuré et simulé à 2GHz en azimut.

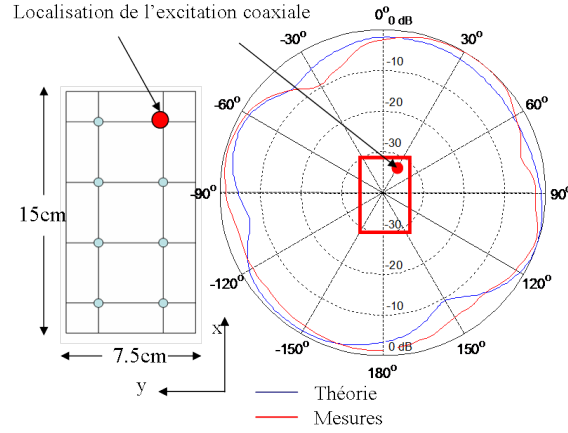


FIGURE 3.31 – Comparaison des diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés théoriques et mesurés en azimut ($\theta = 90^\circ$) du parallélépipède à 2GHz ; excitation au point $P1$ ($x = 131.5mm$; $y = 56.25mm$)

Ces deux diagrammes sont normalisés par rapport à la valeur maximale de chacun. Nous avons obtenu un gain théorique de 0.7dBi. En mesure, le gain est de -12dBi. Malgré cette différence de gain, nous observons des gabarits de diagramme assez similaires. La différence des niveaux s'explique par une forte désadaptation du parallélépipède mesuré mais également par des défauts de réalisation du prototype (parallélépipède et plan de masse).

Par la suite, nous avons mesuré les diagrammes de rayonnement du mini-car avec ouvertures grâce aux moyens de mesure en champ lointain disponibles sur le site de TDF (la présentation du site sera détaillée plus loin). La figure 3.32 montre le diagramme mesuré en azimut à 200MHz.

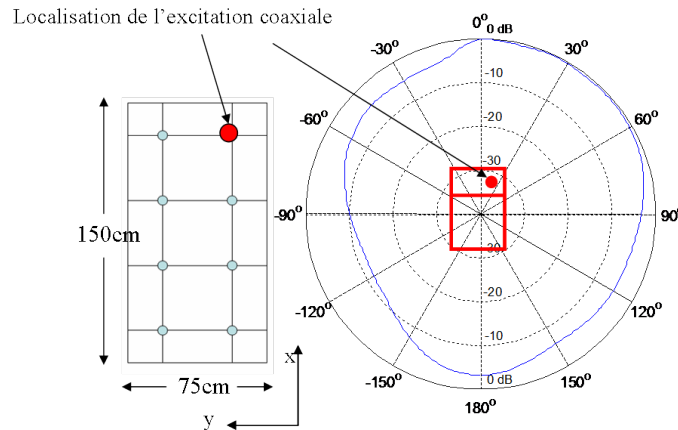


FIGURE 3.32 – Diagramme de rayonnement (E_θ) mesuré en azimut du mini-car avec ouvertures à la base de mesure de TDF à 200MHz

La figure 3.32 est normalisée par rapport au gain maximal de -5.61dBi . Comme on le constate, le diagramme mesuré est très différent de celui théorique (voir figure 3.25 ; gain d'environ 8.2dBi). En effet, plusieurs raisons permettent d'expliquer cette différence. D'une part, le plan de masse utilisé dans la théorie est différent du plan de sol rencontré lors de la mesure. En effet, nous avons eu un sol humide et granuleux sur la base TDF et les propriétés électriques de ce type de sol à 200MHz sont difficilement quantifiables. De ce fait, il devient difficile de caractériser sa contribution. D'autre part, pour assurer la rotation du minicar, un support en bois est utilisé. Ses propriétés anisotropes (en fonction de la fréquence et des coordonnées (x,y,z)) rendent sa modélisation également difficile.

Il est également à remarquer que le diagramme théorique est obtenu en champ lointain tandis que, dans la mesure, du fait des dimensions limitées du plateau tournant (rayon de 4.5m), les conditions de mesure en champ lointain sont à peine vérifiées (0.75m de la limite).

Au vu des différences entre les diagrammes simulé et mesuré du mini-car, nous avons voulu faire une mesure dans des conditions de champ lointain. Pour cela, nous avons réalisé un mini-car non pas à l'échelle $\frac{1}{2}$ mais $\frac{1}{20}$ (que nous appelons micro-car). Cela impose une étude à 2GHz comme dans le cas du parallélépipède. Du fait de ses dimensions réduites, elle peut être mesurée grâce à la base de mesure champ proche de l'IETR. La figure 3.33 montre une comparaison des diagrammes de rayonnement théorique et mesuré en azimut du micro-car dans le plan $\theta = 90^\circ$.

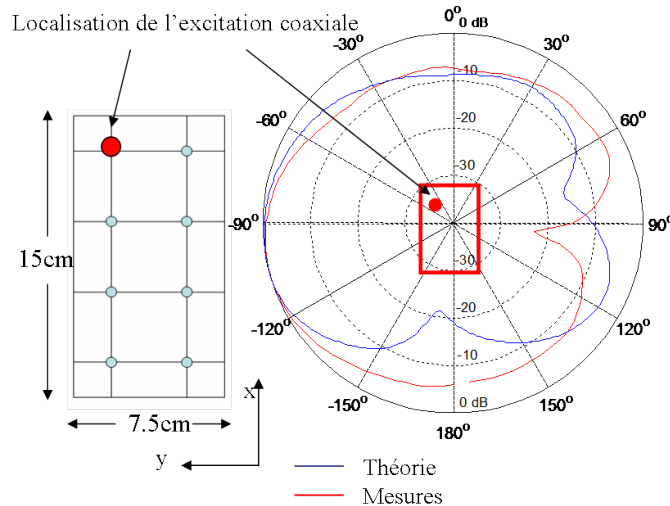


FIGURE 3.33 – Comparaison du diagramme de rayonnement (E_θ) théorique du micro-car à celui mesuré en azimut dans le plan $\theta = 90^\circ$ à 200MHz

Le gain théorique est de 2.9dBi tandis que celui mesuré est de -10.2dBi . Cette différence de gain s'explique par la désadaptation du micro-car mesuré. Mis à part cette différence de niveau, nous avons une concordance acceptable des gabarits de

diagramme de rayonnement sur une large ouverture et particulièrement, on retient que les diagrammes présentent la même orientation azimutale. Néanmoins, il est à remarquer une apparition d'un trou sur le diagramme théorique que l'on ne retrouve pas dans la mesure. Cela est dû à des défauts de réalisation (prise en compte de l'excitateur et du plan de masse).

Nous avons également mesuré l'impédance du parallélépipède et celle du mini-car au point P1. Dans la figure 3.34, nous montrons l'impédance mesurée du mini-car entre 150MHz et 250MHz.

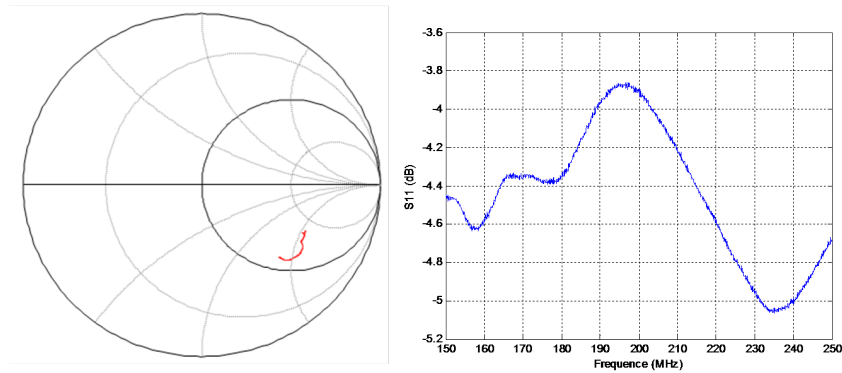


FIGURE 3.34 – Impédance mesurée du mini-car muni d'ouvertures en présence d'un plan de sol réel sur la bande [150MHz-250MHz]

Mis à part une différence de phase due à la difficulté à fixer le plan de référence du câble coaxial, l'impédance mesurée montre une concordance convenable avec celle obtenue en théorie (figure 3.28). On retrouve également le coefficient de réflexion. Ainsi, le circuit d'adaptation présenté dans la théorie est réalisé grâce au transformateur d'impédance représenté sur la figure 3.35.

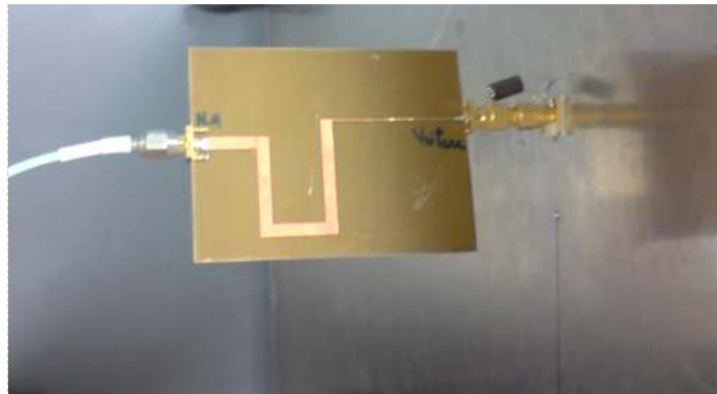


FIGURE 3.35 – Transformateur d'impédance utilisé pour l'adaptation du mini-car dans la bande [150MHz-250MHz]

Comme indiqué précédemment, le principe consiste à ajouter une impédance réfléchie afin de rejoindre l'axe des réels avant de rajouter une ligne quart d'onde pour s'adapter à 50 Ohms. Ce transformateur a permis de comparer les impédances simulées et mesurées du mini-car après la cellule d'adaptation (voir figure 3.36).

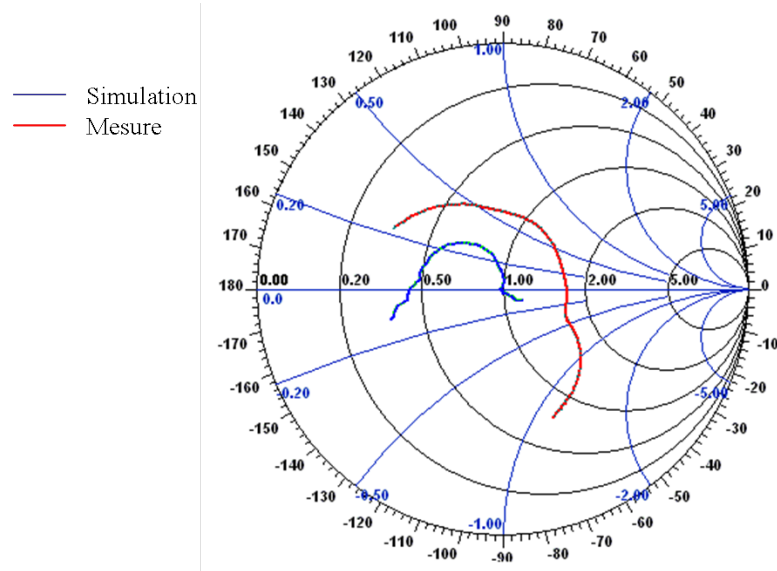


FIGURE 3.36 – Comparaison des impédances simulées et mesurées du mini-car dans la bande [150MHz-250MHz] après insertion d'une cellule d'adaptation

3.4 Bilan de l'étude des véhicules à taille réduite

Ce chapitre a permis de montrer dans un premier temps de manière assez grossière l'influence du véhicule sur la réception de signaux AM ou FM ou même GPS. Les premières expérimentations ont confirmé l'hypothèse assez intuitive selon laquelle des courants se développent sur la structure métallique d'un véhicule lorsque ce dernier est soumis à un champ électromagnétique.

Pour approfondir ceci et pour mieux comprendre ce phénomène sans engager de moyens informatiques trop importants ; nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement de formes d'abord canoniques type parallélépipède rectangle puis à des formes plus proches d'un véhicule lorsque ces derniers sont soumis à un champ électromagnétique. Dans un premier temps ces différentes formes géométriques ont été illuminées par des ondes planes avec diverses incidences et nous avons aussi pu observer le développement des lignes de courant sur ces structures. Malgré la difficulté nous avons donné quelques éléments d'interprétation des formes de courant en fonction de la géométrie de l'objet illuminé.

Pour observer cette fois le rayonnement de ces objets métalliques et sur la base des observations faites lorsque ces objets ont été soumis à des ondes électromagnétiques, nous avons, dans un premier temps, identifié plusieurs points favorables à l'excitation de ces formes par un câble coaxial.

Puis, nous avons simulé le rayonnement de ces formes canoniques ou proches d'un véhicule à taille réduite en fonction de la position des points d'excitation. Nous avons principalement observé que le gabarit des diagrammes de rayonnement évoluait en fonction de la position du point d'excitation tandis que le coefficient de réflexion restait quasi-invariant.

Une étude expérimentale a été menée pour tenter de valider les résultats théoriques obtenus. Si les gabarits des diagrammes de rayonnement et la rotation de ces derniers en fonction de la position du point d'excitation sont assez bien prédits, nous avons relevé des incohérences entre théorie et mesure en ce qui concerne les niveaux max des diagrammes de rayonnement. Ceci n'a pu être que partiellement expliqué.

Néanmoins, ces premiers nous ont convaincu de poursuivre l'étude et dans le chapitre suivant, nous allons présenter le concept car-antenna sur un véhicule de taille réelle.

Chapitre 4

Etude du concept car-antenna sur un véhicule de taille réelle

4.1 Introduction

L'étude présentée dans le chapitre précédent a permis de mettre en évidence les capacités de rayonnement d'un parallélépipède et d'un mini-car. Dans la partie qui suit, il s'agit de passer à un véhicule standard et de vérifier si les conclusions présentées pour des objets plus simples peuvent être transposées. Cette étude permet également de prendre en compte certains éléments constituant un véhicule automobile réel (absorbants, moteur, ouvrants...).

L'étude a été réalisée dans la bande FM (priorité PSA-Peugeot Citroën) sur un véhicule de type C2 pour la partie théorique. Pour la partie expérimentale, c'est également la C2 qui a été principalement utilisée même si l'on montre quelques mesures avec une C4, une C5 ou encore une Peugeot 407.

Ce chapitre est divisé en trois parties. Dans un premier temps, nous illuminons le véhicule par une onde plane selon trois directions dans le but d'analyser les distributions des courants surfaciques sur la structure du véhicule. Les différentes directions d'arrivée des ondes planes sont les mêmes que celles décrites dans le cadre de l'étude du mini-car. De cette illumination, nous identifions les zones du véhicule pour lesquelles les courants restent assez forts et presque invariants. Ces zones sont par la suite utilisées comme points excitateurs du véhicule lorsque ce dernier fonctionne en objet rayonnant.

Sur la base de ces résultats, nous calculons ensuite les diagrammes et les impédances théoriques (prise en compte du plan de sol) du véhicule en fonction du point d'excitation avant de les comparer à des mesures.

Pour conclure, nous comparons les résultats quantitatifs (spectres et diagrammes de rayonnement) et qualitatifs (écoute) de mesure du concept car-antenna appliqué à la C2 avec ceux de l'antenne fouet de référence.

Ceci se fera en comparant le concept car-antenna au système antennaire de référence (fouet) aujourd'hui utilisé dans le domaine de l'automobile.

4.2 Examen de la répartition des courants sur le véhicule illuminé par une onde plane

Dans cette partie, toutes les simulations sont faites en présence d'un plan de sol réel ($\epsilon=15$; $\sigma=2.10^{-3}\text{S/m}$) car dans le cas de l'étude des formes canoniques, nous avons montré que la présence ou non du plan de sol n'influe que sur les niveaux et non sur la distribution des courants surfaciques induits par les ondes électromagnétiques qui illuminent le véhicule.

4.2.1 Illumination de la Citroën C2 par une onde plane

L'illumination du véhicule est réalisée avec une onde plane incidente à polarisation verticale. Les trois directions d'arrivée suivantes sont étudiées :

- Onde plane venant de l'arrière du véhicule ($\theta=90^\circ$; $\phi=180^\circ$)
- Onde plane venant de l'avant du véhicule ($\theta=90^\circ$; $\phi=0^\circ$)
- Onde plane venant de l'un des côtés véhicule ($\theta=90^\circ$; $\phi=90^\circ$)

Les caractéristiques de l'onde plane sont identiques à celles utilisées dans le cas de l'illumination des formes simples à échelle réduite. La figure 4.1 montre le véhicule dans le repère utilisé.

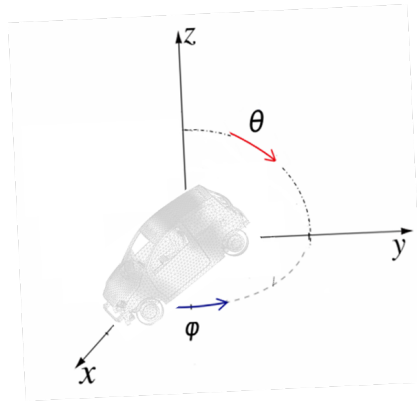


FIGURE 4.1 – Rappel du repère utilisé

Dans un premier temps, nous présentons la description des courants sur la surface du véhicule en fonction de la direction d'arrivée de l'onde plane, puis nous analysons cette description du courant sur la surface du véhicule afin d'identifier les zones où les courants sont assez forts et sans grandes variations. Ceci permettra de déterminer les zones favorables à l'excitation du véhicule.

4.2.1.1 Présentation des courants sur la surface du véhicule en fonction de la direction d'arrivée des ondes planes

La figure 4.2 montre la description du courant sur la C2 pour une onde plane venant de l'arrière à 100MHz ($\theta=90^\circ$; $\phi=180^\circ$).

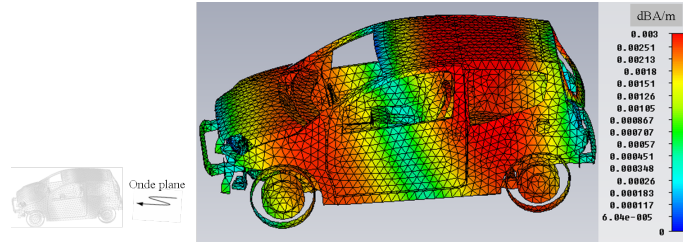


FIGURE 4.2 – Cartographie des courants induits par l'illumination de la C2 par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$; $\phi=180^\circ$) du véhicule à 100MHz (vue de face; $\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

La longueur de la Citroën C2 est voisine de $3.5m$, ce qui correspond à environ une longueur d'onde à 100MHz. Cette correspondance des grandeurs explique les nuls de courants observés aux extrémités du véhicule ainsi qu'en son milieu (figure 4.2). Les courants forts sont localisés environ au quart et au $\frac{3}{4}$ de la longueur du véhicule.

Cette observation faite à la fréquence 100MHz reste valable lorsque l'on parcourt toute la bande FM. Le résultat ne change pas considérablement du fait de la faible variation de la longueur d'onde dans cette bande. Dans la bande [87MHz–108MHz], la longueur d'onde varie entre $2.8m$ et $3.45m$. Cette variation de $65cm$ reste modeste devant la plus grande dimension du véhicule ($3.54m$).

Nous avons également illuminé le véhicule par une onde plane venant de l'avant. La figure 4.3 montre la description des courants surfaciques sur la structure du véhicule consécutive à cette illumination ($\theta=90^\circ$; $\phi=0^\circ$).

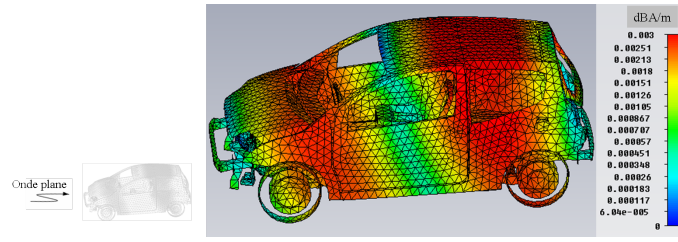


FIGURE 4.3 – Cartographie des courants induits par l’illumination de la *C2* par une onde plane venant de l’avant ($\theta=90^\circ$; $\phi=0^\circ$) du véhicule à 100MHz (vue de face; $\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$)

Le résultat est très proche de celui observé dans le cas précédent où l’onde vient de l’arrière du véhicule (les descriptions de courant sont très similaires). Nous notons une légère chute du niveau des courants mais globalement la répartition reste inchangée. La non variation de la distribution du courant est due au fait que le véhicule se comporte également dans ce cas comme une antenne de dimensions voisines d’une longueur d’onde (λ) à 100MHz.

Par contre, si l’onde plane arrive par l’un des côtés du véhicule ($\theta=90^\circ$; $\phi=90^\circ$), nous obtenons la description représentée sur la figure 4.4.

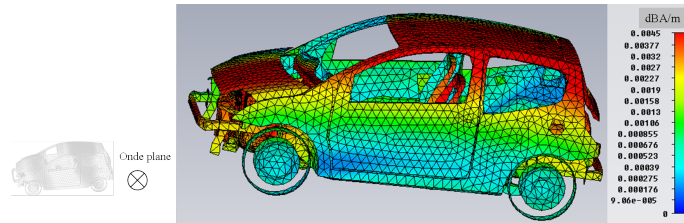


FIGURE 4.4 – Cartographie des courants sur une *C2* illuminée par une onde plane venant du côté ($\theta=90^\circ$; $\phi=90^\circ$) à 100MHz

Avec cette direction d’arrivée, l’onde est interceptée par le véhicule dans sa largeur et cette dernière est de l’ordre de 1.7m. Ceci est proche d’une demi-longueur d’onde à 100MHz (1.5m). Cette dimension correspond à une demi-période spatiale à cette fréquence. Ceci explique d’une part, la présence de nuls de courant sur les bords et d’autre part d’un maximum au centre du véhicule.

4.2.1.2 Analyse de la description des courants sur la structure du véhicule suite à l’illumination

De la même manière que pour le mini-car, nous exploitons les distributions de courant induites par l’illumination de la *C2* pour déterminer les points d’accès favorables à l’excitation du véhicule de manière à ce que ce dernier devienne un élément rayonnant à part entière.

Si l'on choisit des points d'accès dans les zones où le courant est nul, on n'aura simplement pas ou peu de rayonnement. De même, si l'on choisit des zones où le courant est maximal, l'impédance d'entrée sera très faible et le rayonnement de la structure le sera également. De ce fait, il est plus judicieux de choisir une zone où le courant n'est ni trop fort ni trop faible. Pour cela, nous choisissons les zones se situant sur la moyenne (entre le maximum et le minimum de courants). De fait, comme dans le chapitre précédent, nous déterminons les zones où le courant n'est ni minimal ni maximal et où ce dernier présente peu de variations.

L'illumination du véhicule par une onde plane venant de l'avant ou de l'arrière du véhicule donne lieu à une variation du courant sur une période spatiale entière (en considérant la variation sur la longueur du véhicule). Par contre, lorsque le véhicule est illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés, le courant varie sur une demi-période. La position des maxima, des minima et l'examen des niveaux montrent que ces variations présentent une forme sinusoïdale.

En résumé, avec un raisonnement limité à la partie inférieure du véhicule, nous représentons les zones favorables identifiées sur la figure 4.5 lorsque le véhicule est illuminé par une onde venant de l'avant, de l'arrière ou de l'un de ses côtés.

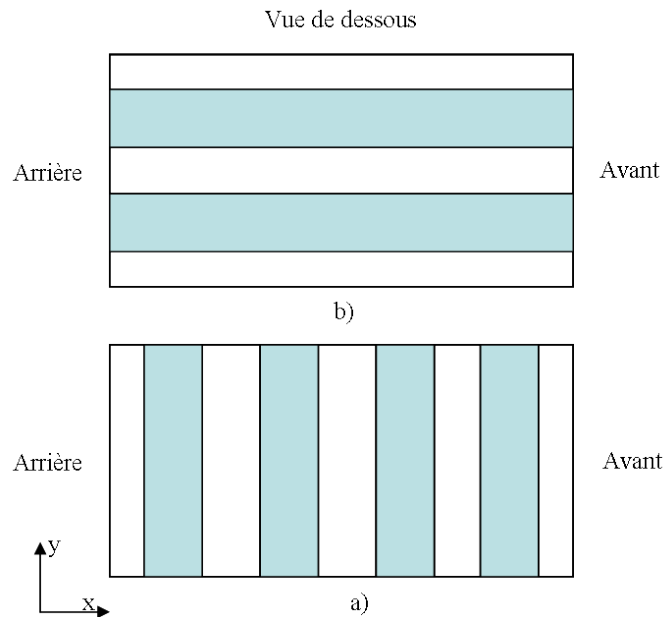


FIGURE 4.5 – Vue de dessous du véhicule et les zones où le courant varie peu suite à l'illumination du véhicule par une onde plane

- a) Onde plane venant de l'avant ou de l'arrière du véhicule.
- b) Onde plane venant de l'un des côtés du véhicule.

4.2.2 Bilan

L'illumination du véhicule nous a permis d'identifier des zones où le courant varie peu et que nous supposons adéquates pour exciter le véhicule afin que celui-ci puisse rayonner. Pour tenir compte de l'ensemble des incidences possibles, on fait l'intersection des zones identifiées pour chaque incidence. Ceci permet de définir des zones sur le véhicule où le courant variera peu quelle que soit l'incidence de l'onde qui arrive sur ce dernier. Par réciprocité, pour faire rayonner le véhicules, on choisit ces zones comme points d'excitation du car-antenna. La figure 4.6 montre les zones finalement retenues pour alimenter le car-antenna afin d'assurer un rayonnement de ce dernier en bande FM.

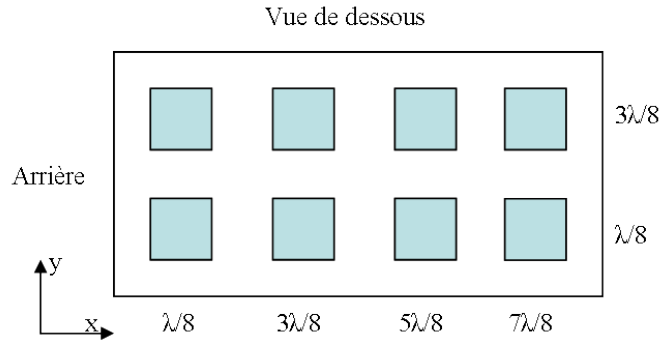


FIGURE 4.6 – Vue de dessous du véhicule avec les zones pour lesquelles les courants varient peu dans la bande FM

Des améliorations dans notre processus de choix de ces zones peuvent être envisagées car nous n'avons pris que trois exemples de directions d'ondes planes. En effet, pour une analyse complète, il faudrait examiner plusieurs directions d'arrivée d'ondes planes avec des incidences différentes.

4.3 Détermination des diagrammes de rayonnement et des impédances d'entrée pour quelques points d'excitation dans la bande FM

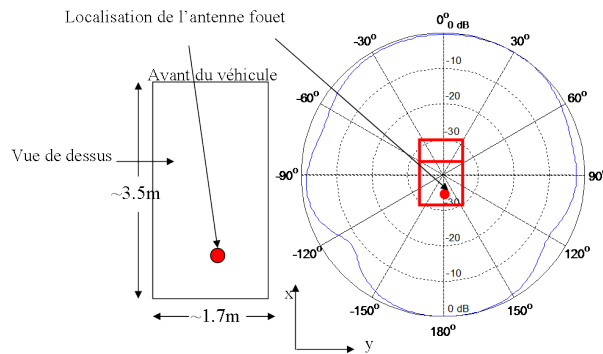
Comme dans le cas de l'étude du mini-car, nous calculons les diagrammes de rayonnement ainsi que les impédances d'entrée pour des points excitateurs se situant dans les zones sélectionnées à partir de l'illumination du véhicule par une onde plane. Pour les diagrammes de rayonnement, on compare également les performances du système antennaire utilisé actuellement (fouet) avec ceux du car-antenna.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats théoriques de l'étude de l'antenne de référence avant de les comparer avec ceux obtenus avec le concept car-

antenna. Dans un second temps, les résultats des différentes campagnes de mesure seront présentés et accompagnés d'une comparaison aux résultats théoriques.

4.3.1 Les diagrammes de rayonnement théoriques

Etant donné que tous les résultats sont comparés au système antennaire de référence (antenne fouet), nous présentons dans un premier temps le diagramme de rayonnement de ce dernier. La figure 4.7 montre le diagramme de rayonnement théorique à 100MHz en azimut de l'antenne fouet au dessus du toit d'une Citroën C2.



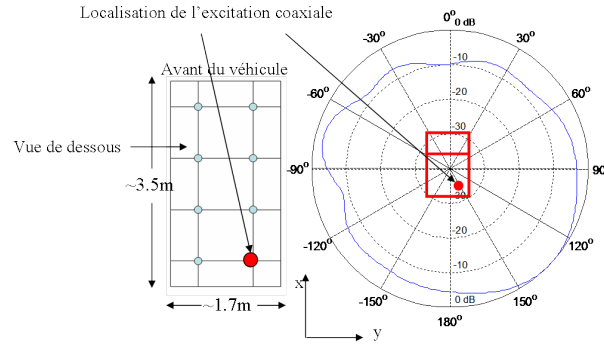


FIGURE 4.8 – Diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé théorique en azimut ($\theta=90^\circ$) du concept car-antenna appliqué à une C2 au point P1 ($x = 471mm$; $y = 384mm$) pour une vue de dessous de la C2 à 100MHz

Comme dans le cas du mini-car, nous constatons que le diagramme de rayonnement est pointé dans le secteur angulaire où se trouve le point d'excitation. Le gain maximal obtenu est de 8.3dBi avec des ondulations allant jusqu'à 10dB. Nous avons également excité la C2 au point P2. La figure 4.9 montre le diagramme de rayonnement obtenu.

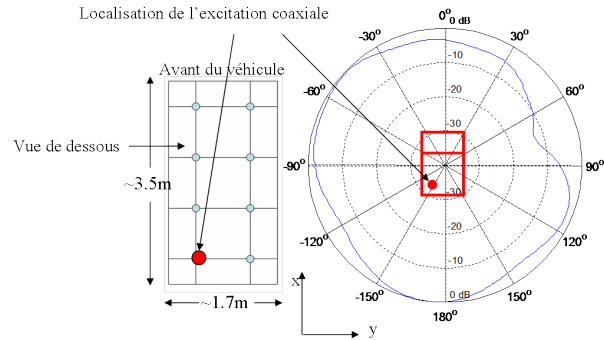


FIGURE 4.9 – Diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé théorique en azimut ($\theta=90^\circ$) du concept car-antenna appliqué à une C2 au point P2 ($x = 400mm$; $y = 84mm$) pour une vue de dessous de la C2 à 100MHz

Comme dans le cas de l'excitation au point P1, nous observons que globalement, le diagramme de rayonnement s'oriente vers le point exciteur. Le véhicule n'étant pas symétrique, les diagrammes présentent des caractéristiques différentes selon qu'on l'excite au point P1 ou P2.

Si l'on compare les performances du car-antenna (excitation du point P1) à ceux de l'antenne fouet de référence, on note principalement que le diagramme de rayonnement du système antenne de référence (antenne fouet) présente moins d'ondulations que celui du concept car-antenna. La principale différence concerne le gabarit des diagrammes de rayonnement qui reste fixe dans le cas de l'antenne fouet alors qu'il est modifié par la localisation du point d'excitation pour le car-antenna. Le diagramme

de rayonnement du car-antenna présente un meilleur gain. Cela est essentiellement dû à la taille importante du car-antenna comparée à celle du fouet.

4.3.2 Les diagrammes de rayonnement expérimentaux

Au delà de cette étude théorique, différentes campagnes de mesure ont été effectuées. Nous présentons, dans ce paragraphe, les essais menés sur différents sites de PSA Peugeot Citroën et sur la base de mesure de TDF. Ces campagnes d'expérimentation nous ont permis de mesurer des diagrammes de rayonnement du système de référence ainsi que ceux du car-antenna. Dans la partie qui suit, nous présentons ces différents résultats.

4.3.2.1 La caractérisation sur la base de mesure de PSA-Nanterre

Le site de mesure de Nanterre comporte une chambre anéchoïque dans laquelle est placée un plateau tournant. Ce plateau métallique est commandé grâce à un moteur se situant à l'extérieur de la chambre. Une fois le véhicule sous test (VST) placé sur la plaque métallique, une antenne d'émission est utilisée pour l'illuminer. Les polarisations verticales et horizontales sont étudiées.

Le prélèvement du signal utile est fait grâce à un câble coaxial et son transport est assuré par une fibre optique après conversion du signal électrique. Afin d'éviter les réflexions de l'onde incidente sur le sol (métallique), une masse absorbante constituée de ferrite est placée sur le sol. Le centre de commande se situe à l'extérieur de la chambre et permet de commander, à la fois, la vitesse et le pas du moteur. Cela permet de contrôler le déplacement du VST. Les diagrammes de rayonnement sont mesurés à trois fréquences significatives dans la bande FM (88MHz, 98MHz, 107MHz).

Dans un premier temps, nous procédons à la mesure de l'antenne FM principale de la C2 (typiquement appelée antenne FM1). Elle est de type fouet et se situe sur la partie arrière du toit du véhicule. La figure 4.10 montre l'antenne sur le toit du véhicule ainsi que le repère utilisé dans l'expérimentation.

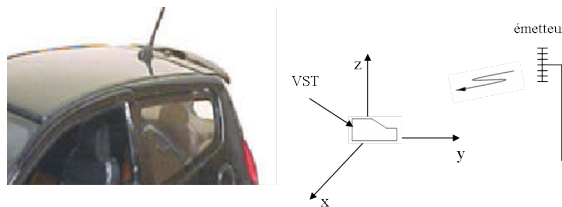


FIGURE 4.10 – Antenne fouet FM placée sur le toit d'une C2 (véhicule sous test-VST) et repère utilisé pour l'expérimentation

Les diagrammes de rayonnement en azimut en polarisation verticale de l'antenne fouet sont présentés sur la figure 4.11.

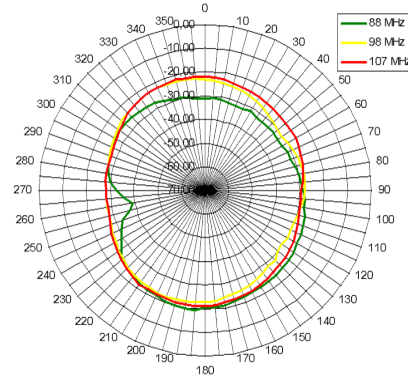


FIGURE 4.11 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés en azimut ($\theta=90^\circ$) de l'antenne fouet FM en polarisation verticale sur le site de Nanterre pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz

Le maximum de niveau (environ -20dBm) est obtenu à $\phi=0^\circ$ ou à 180° . Ces angles correspondent aux positions où l'antenne d'émission illumine le véhicule suivant sa longueur (vue de devant ou de derrière). Ce comportement du diagramme est dû à la position de l'antenne sur le plan de masse (véhicule). Nous notons également que le diagramme de rayonnement présente un trou à 88MHz (vers 260°). Ce dernier se retrouve dans toutes les mesures faites à cette fréquence dans cette chambre anéchoïque et doit être considéré comme une imperfection de cette chambre.

Par la suite, nous avons mesuré le diagramme de rayonnement du car-antenna en choisissant différents points d'excitation. Dans un premier temps, nous prélevons le signal utile sur le pot d'échappement. La figure 4.12 montre les diagrammes obtenus.

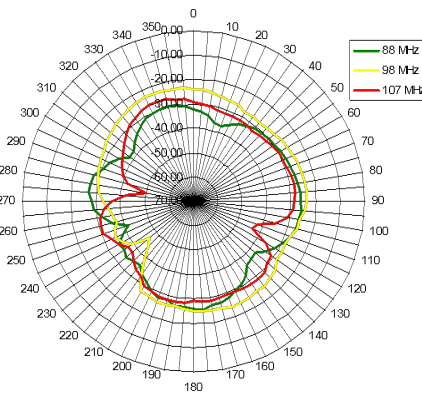


FIGURE 4.12 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés en azimut ($\theta=90^\circ$) du car-antenna pour un branchement sur le pot d'échappement pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz

Nous observons un niveau maximal de -23dBm à 98MHz. Cette valeur est obtenue à 340° ; cela correspond à un angle où le véhicule est vu suivant sa longueur

par l'antenne d'émission (illumination du véhicule par l'avant). Nous constatons également la présence de trous dans certaines directions contrairement à ce qui a été observé sur le diagramme de l'antenne fouet d'origine. Le trou dû à la chambre est également observé à 250° pour la fréquence 88MHz. Même si on note un maximum de rayonnement proche de celui de l'antenne de référence, les ondulations sont assez fortes. En effet, l'antenne de référence présente moins de 10dB d'ondulation tandis que le car-antenna, en ce point d'excitation, présente plus de 20dB.

Nous avons également testé d'autres points d'excitation tels que la glissière du siège du conducteur. Le diagramme de rayonnement pour ce point d'excitation est représenté sur la figure 4.13.

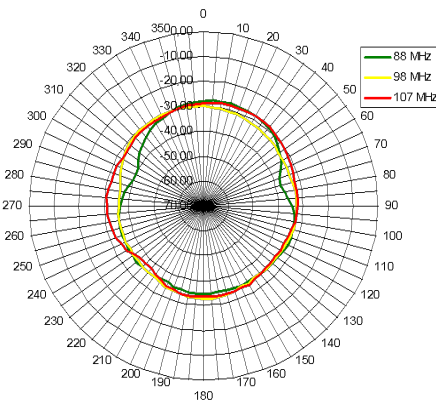


FIGURE 4.13 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés en azimut ($\theta=90^\circ$) pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz ; branchement sur la glissière

La figure 4.13 montre un niveau maximal reçu de -28dBm . Ce niveau est en dessous de celui observé lors du branchement sur le pot d'échappement (il était de -23dBm). On note que, pour cette position de l'excitation, le diagramme présente moins d'ondulation (10dB au lieu de 20dB).

Ensuite, nous avons choisi un point d'excitation se trouvant sur la boucle d'attache de la ceinture de sécurité. La figure 4.14 montre le diagramme de rayonnement obtenu.

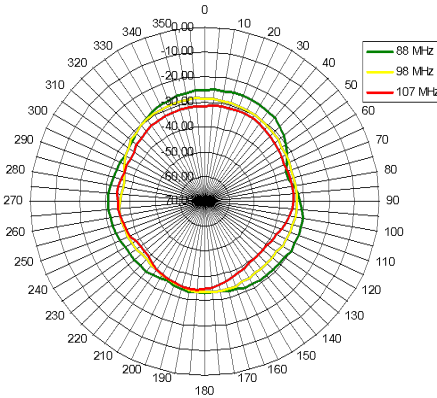


FIGURE 4.14 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) mesurés du car-antenna en azimut ($\theta=90^\circ$) pour les fréquences 88MHz, 98MHz, 107MHz ; branchement sur la boucle d’attache de la ceinture de sécurité

Comme dans le cas de la glissière, nous avons un diagramme pratiquement omnidirectionnel (moins de 8dB au lieu des 20dB observé lors du branchement sur le pot d’échappement). Le maximum de niveau est par contre plus important. Il est de -23dBm pour la fréquence de 88MHz au lieu de -28dBm .

Les enseignements que nous pouvons tirer de ces mesures sont les suivants :

- Les niveaux mesurés sur le car-antenna sont en moyenne 10dB en dessous des niveaux fournis par le système antenne de référence de ce véhicule.
- Les ondulations du car-antenna peuvent aller de 10dB à 20dB (selon le point d’encrage) tandis que l’antenne fouet en présente que 8dB au maximum. Pour consolider ces observations, des mesures complémentaires sont faites sur la base de mesure de TDF.

4.3.2.2 Mesures effectuées sur le site de TDF

Cette campagne de mesure vise à compléter les résultats des mesures de la base de PSA-Nanterre. L’objectif est donc de mesurer les diagrammes de rayonnement pour quelques points d’excitation différents sur une Citroën C2. Dans un premier temps, nous présentons le site de mesure avant de détailler les résultats des différentes mesures effectuées.

Le centre de mesure d’antennes (CMA) de TDF est composé de 4 bases de mesure différentes selon les applications visées. Dans le cas de notre étude, nous utilisons l’arche. Cette base de mesure est utilisée pour fonctionner dans la bande [60MHz-2GHz]. Elle permet de recueillir le champ autour de l’antenne sous test dans une demi sphère grâce à une sonde. Cette sonde (dipôle) est disposée sur un bras qui tourne autour de l’antenne à tester, permettant ainsi de prélever le champ rayonné dans un demi-espace. Au sol, l’arche est munie d’un positionneur permettant d’orienter l’élément sous test dans toutes les directions et ceci de façon continue. L’influence

du support (véhicule ou autre) et du sol est directement prise en compte.

La figure 4.15 montre un exemple où le diagramme de rayonnement d'une antenne d'un véhicule de Peugeot est mesuré.



FIGURE 4.15 – Photo de l'arche en présence d'une voiture sous test

Les appareils de mesure utilisés sont un analyseur de réseau HP ou Rohde&Schwartz ZPV, un mesureur de champ ESVP et un analyseur d'antenne ESTAR 2110.

La mesure est faite dans trois plans de coupe : l'azimut, le plan avant-arrière du véhicule et enfin gauche-droite. La figure 4.16 montre une illustration de ces différents plans de coupe.

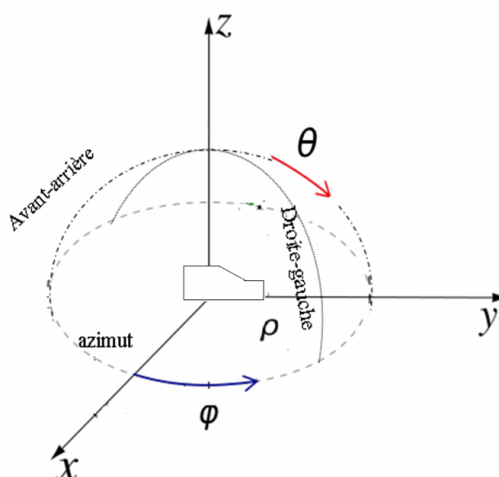


FIGURE 4.16 – Illustration du repère utilisé par l'arche dans la caractérisation d'antennes (θ, ρ, ϕ sont les coordonnées du repère sphérique)

Les diagrammes de rayonnement sont mesurés à trois fréquences de la bande FM : 87MHz, 100MHz et 107MHz. Sept points de mesures ont été pris sur la structure métallique du véhicule. On note que ces points ont été choisis pour des raisons d'accessibilité.

- Au contact avec le support du levier de frein à main avec la structure du véhicule ($P1$)
- Au point d'accroche de la ceinture arrière de sécurité à gauche ($P2$)
- Au point d'accroche de la ceinture arrière de sécurité à droite ($P3$)
- Au bloc moteur (tendeur de courroie d'entraînement d'accessoires ($P4$))
- Au niveau du phare avant gauche ($P5$)
- Au niveau du coffre arrière gauche ($P6$)
- Derrière la console auto radio ($P7$)

Pour chacun de ces différents points, on trace le diagramme de rayonnement pour les trois plans de coupe décrits précédemment. Nous avons également mesuré le diagramme de rayonnement de l'antenne fouet de référence actuellement sur la C2 pour la réception FM.

Chacun des diagrammes de rayonnement présentés est normalisé par rapport à son gain maximal. Par souci de concision, nous ne présentons dans ce paragraphe que les diagrammes de rayonnement mesurées pour les points $P1$, $P2$, $P3$, $P4$. Les autres résultats de mesure sont disponibles en annexe C.

- Mesure pour une excitation au point $P1$

Comme indiqué sur la figure 4.17, le point $P1$ se situe sur le levier de frein à main.



FIGURE 4.17 – Photo du branchement du câble coaxial au niveau du levier de frein à main

La figure 4.18 montre les diagrammes obtenus dans les 3 plans de coupe lorsqu'un branchement au point $P1$ est effectué.

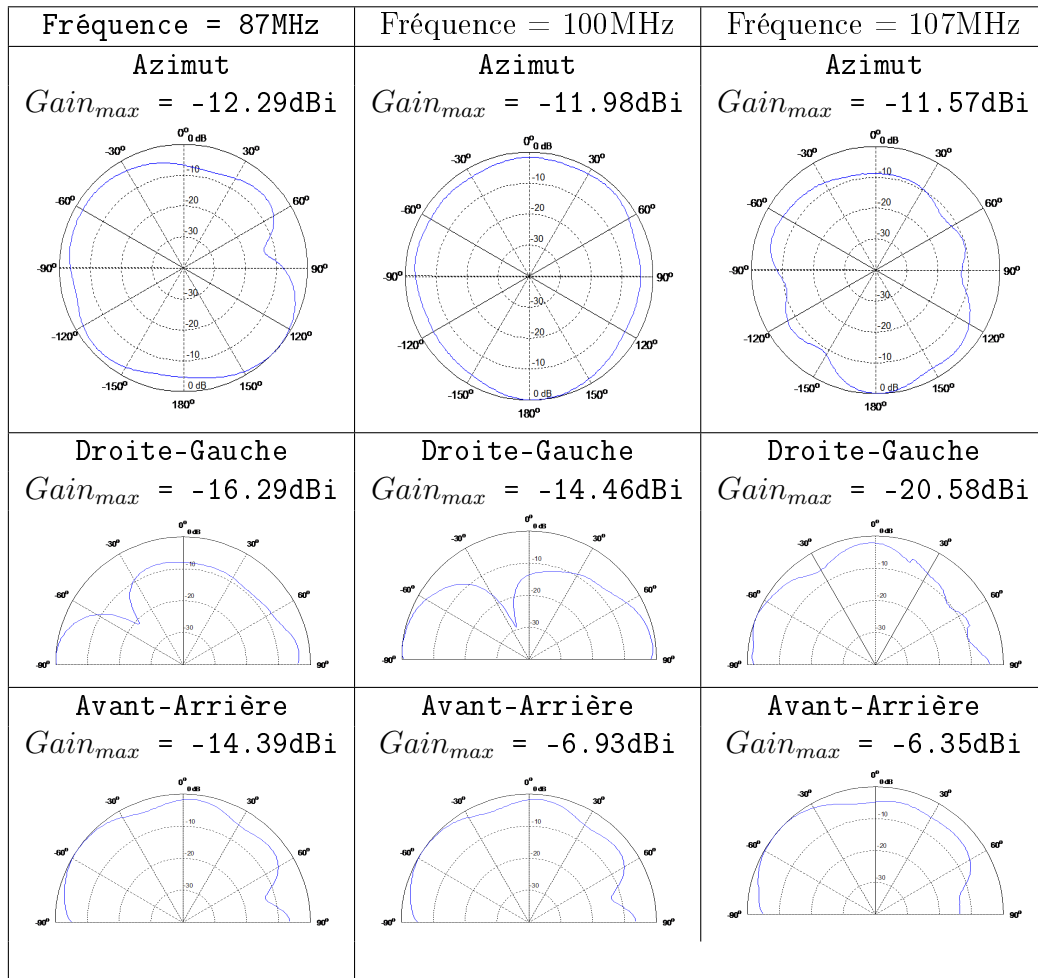


FIGURE 4.18 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès P1 à 87MHz à 100MHz et 107MHz

Ensuite, nous avons examiné un autre point se situant au point d'accrochage de la ceinture arrière droite.

- Mesure pour une excitation au point P2

La configuration étudiée est représentée sur la figure 4.19 ci après.



FIGURE 4.19 – Branchement au niveau de la ceinture de sécurité arrière droit (P2)

Comme dans le cas du point P1, nous mesurons les diagrammes pour trois fréquences données. La figure 4.20 montre ces diagrammes de rayonnement ainsi que les gains maximaux correspondants.

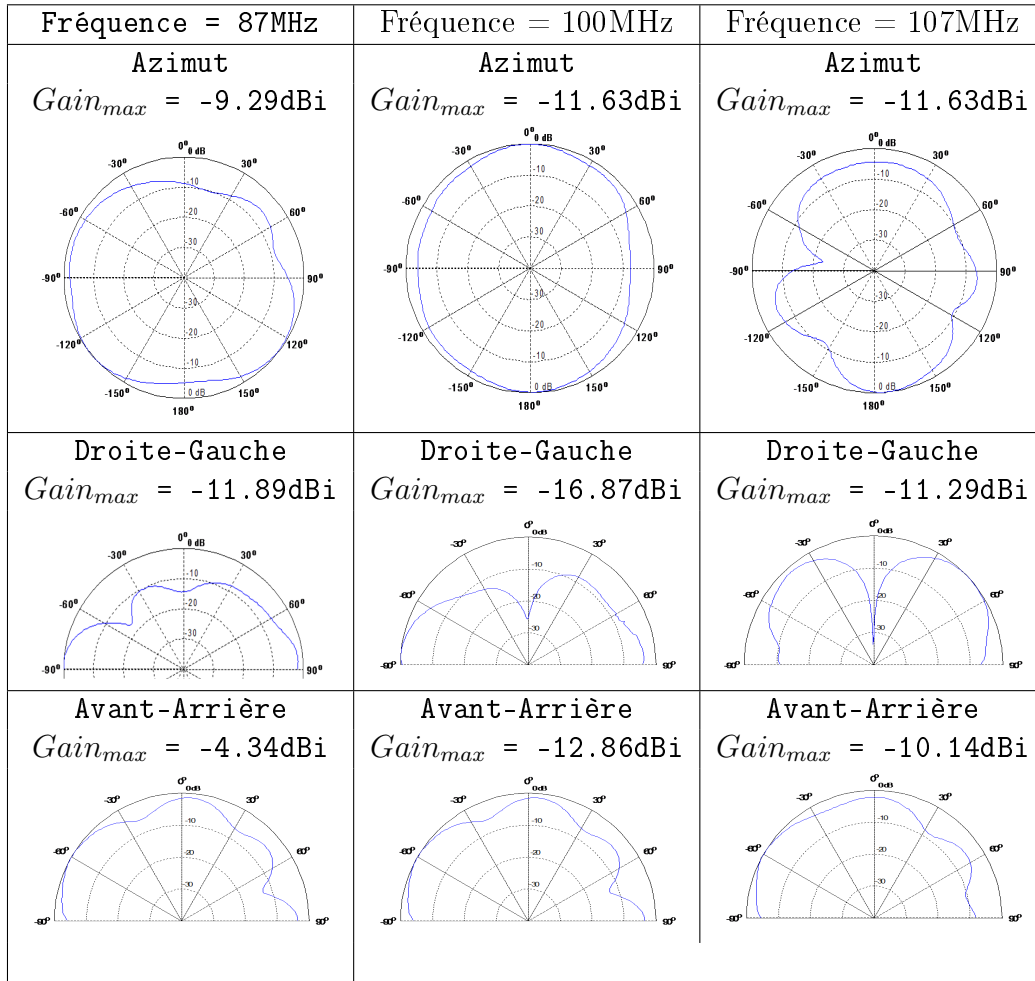


FIGURE 4.20 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P2$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz

A la suite de la mesure faite au point $P2$, nous avons refait la même mesure mais cette fois sur le côté gauche de la ceinture de sécurité ($P3$).

– Mesure pour une excitation au point $P3$

La configuration étudiée est représentée sur la figure 4.21 qui suit.



FIGURE 4.21 – Branchement au niveau de la ceinture de sécurité arrière gauche ($P3$)

La figure 4.22 nous montre les diagrammes de rayonnement obtenus.

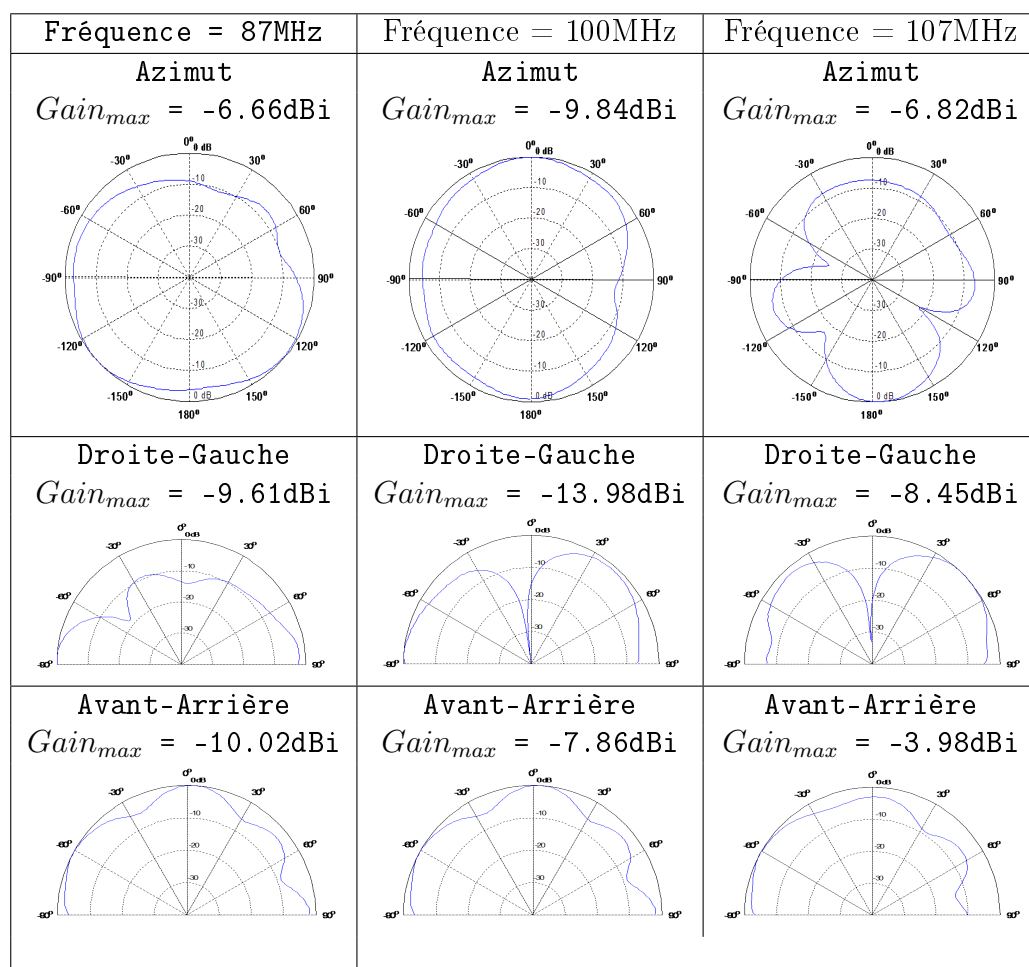


FIGURE 4.22 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P3$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz

Enfin, un branchement sur le bloc moteur est effectué, précisément au niveau du tendeur de courroie d'entraînement d'accessoires.

- Mesure pour une excitation au point $P4$

La configuration étudiée est représentée sur la figure 4.23.



FIGURE 4.23 – Mise en évidence du branchement ($P4$)

Notons que pour cette configuration, deux mesures ont été faites. Une première avec le moteur à l'arrêt et une seconde avec le moteur en fonctionnement. Les résultats

obtenus sont semblables. Nous ne présentons donc que ceux obtenus avec le moteur à l'arrêt (figure 4.24).

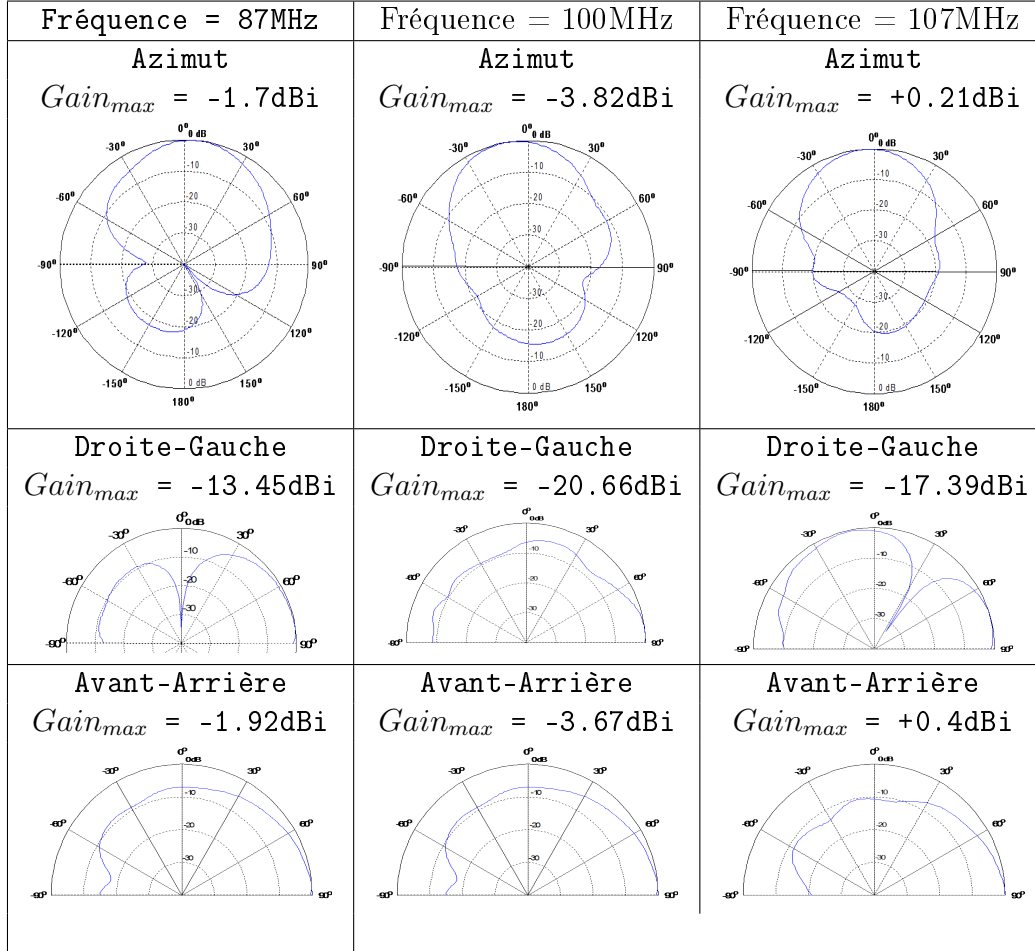


FIGURE 4.24 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P4$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz

Par la suite nous avons mesuré le diagramme de rayonnement de l'antenne fouet au dessus de la $C2$.

– Mesure du diagramme de rayonnement de l'antenne fouet :

La figure 4.25 montre l'antenne fouet étudiée.



FIGURE 4.25 – Antenne fouet FM au dessus du toit de la ($C2$)

Nous présentons les diagrammes mesurés pour les trois plans de coupe jusque là étudiés sur la figure 4.26.

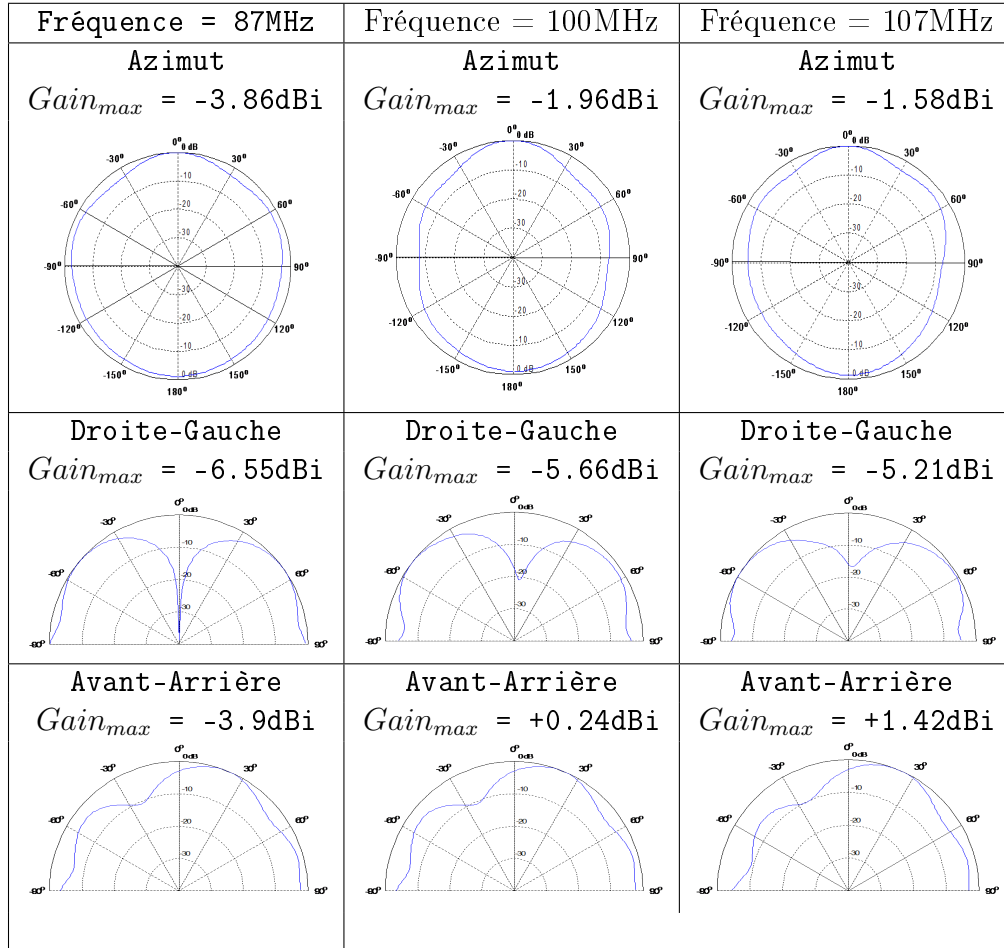


FIGURE 4.26 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et gains maximaux correspondants de l'antenne fouet au dessus de la C2 à 87MHz à 100MHz et 107MHz

Les valeurs maximales de gain montrent un manque de niveau du principe car-antenna par rapport au système antennaire de référence (antenne fouet FM). Si l'on compare les contributions azimutales, nous observons que l'antenne fouet présente un gain moyen de -2dBi tandis que le meilleur gain moyen observé dans le cas du car-antenna est à -7dBi pour le point P3. Le point d'accès P4 présente un gain intéressant ($+0.24\text{dBi}$ au max) mais son diagramme très directif ne semble pas propice à une réception en bande FM. Le gabarit du diagramme de rayonnement du point P2 est quasi identique à celui du point P3 mais ce dernier présente un meilleur gain (3dB de plus). Néanmoins, P2 présente moins d'ondulations que P3 (8dB pour P2 à 100MHz au lieu de 13dB pour P3 à cette même fréquence). L'antenne de référence quant à elle présente une ondulation allant de 4dB à 8dB.

Nous avons également remarqué que le trou de l'antenne fouet présent sur le diagramme obtenu dans le plan de coupe Avant-Arrière est moins accentué que dans le cas d'un monopole classique. On note que ce trou n'est pas sur l'axe $\theta=0^\circ$ mais plutôt sur l'axe $\theta=-20^\circ$. Ce décalage est lié à l'inclinaison du monopole sur le plan de masse (véhicule) tandis que l'atténuation du trou est due à l'influence du véhicule sur le rayonnement. De plus la mesure ne retrouve pas le gain théorique d'un monopole classique. Cela est également dû aux différentes pertes introduites par le véhicule.

Le calcul des diagrammes de rayonnement théoriques a montré l'influence du type de structure (parallélépipède, mini-car ou C2) sur leurs formes. Dans la suite, nous proposons de vérifier par la mesure l'influence du type de véhicule sur le rayonnement. Pour cela, mesure le diagramme de rayonnement de la Citroën C5 à la base de mesure de TDF. Les bandes de fréquence sont les mêmes que celles utilisées avec la C2. Les points pour lesquels les diagrammes sont mesurés sont les suivants :

- Au niveau de la fixation de l'aile avant droit (P1)
- Au niveau de la glissière avant droite (P6)

Comme dans le cas de la C2, nous présentons les différents diagrammes de rayonnement mesurés. Dans cette étude, seuls les diagrammes en azimut ont été mesurés. La figure 4.27 montre le point d'accrochage P1 ainsi que le diagramme de rayonnement associé. Notons également que nous ne présentons que les diagrammes mesurés à 100MHz.

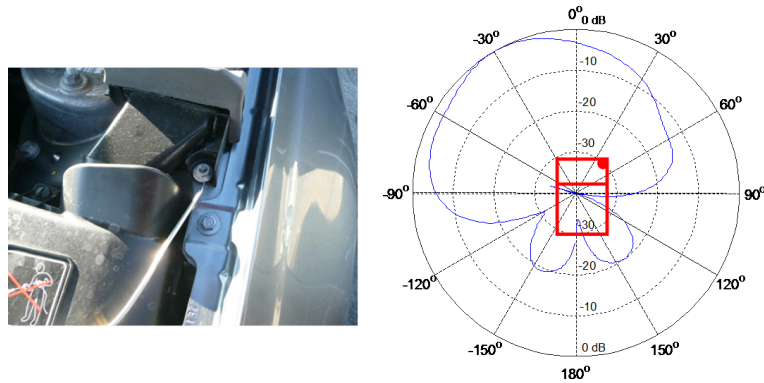


FIGURE 4.27 – Photo du branchement au point P1 et du diagramme de rayonnement (E_θ) associé en azimut à 100MHz

Ensuite lorsqu'on effectue un branchement au point P6, on obtient le diagramme de rayonnement de la figure 4.28.

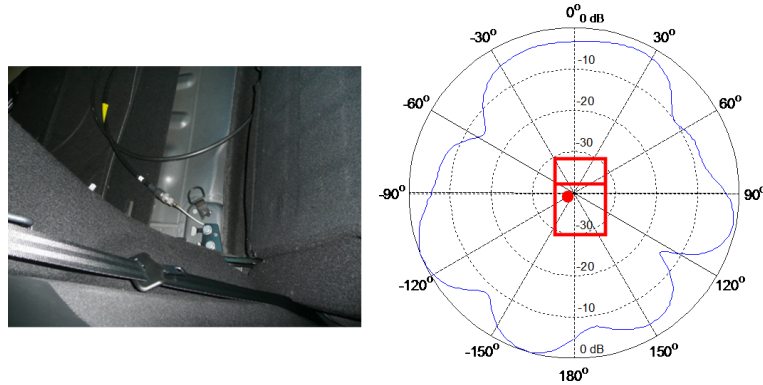


FIGURE 4.28 – Photo du branchement au point $P6$ et du diagramme de rayonnement (E_θ) associé en azimut à 100MHz

Au point $P1$, nous obtenons un diagramme de rayonnement directif avec un gain maximal de +2.82dB à 107MHz comparable à celui obtenu lors de la connexion sur le moteur de la $C2$ ($P4$). Comme le point $P4$ de la $C2$, le point $P1$ de la $C5$ ne peut être utilisé pour la réception en bande FM. Au point $P6$, nous mesurons un diagramme moins directif que celui obtenu pour le point $P1$. En ce point, le diagramme de rayonnement présente tout de même des ondulations allant jusqu'à 15dB avec un gain maximal de -1.52dBi à 107MHz. Cela correspond aux mesures faites sur la $C2$ aux points $P2$ et $P3$. Par ailleurs, nous notons que les gains de la $C5$ sont plus importants que ceux de la $C2$. Cela est probablement dû aux différences de tailles des véhicules.

A la vue de ces différents diagrammes ainsi que des niveaux de gain, on peut conclure que le système antennaire aujourd'hui utilisé est au dessus du concept car-antenna d'un point de vue du niveau de réception mais également de l'homogénéité du diagramme de rayonnement. Néanmoins, comme prévu théoriquement, les diagrammes de rayonnement obtenus avec le car-antenna varient en fonction du point d'excitation. Cela lui confère une propriété multi-diagramme. Enfin, on peut ajouter qu'une amplification raisonnable permettrait de contrôler la différence de niveau entre le car-antenna et l'antenne fouet.

4.3.3 Présentation des impédances d'entrée

Pour compléter les caractéristiques de rayonnement, nous présentons les impédances des deux systèmes antennaires. Notons, le concept car antenna utilise la structure métallique du véhicule pour émettre ou recevoir des signaux radio-électriques. Cette structure est également utilisée pour servir de masse électrique de l'ensemble des équipements radio présents dans un véhicule. Donc, relier la gaine du câble d'alimentation au châssis amènerait un court-circuit. Pour palier ce problème, une self de choc est insérée entre la gaine et la structure métallique du véhicule. La valeur de la self est optimisée de manière à interdire le passage des signaux HF de la structure

métallique vers la gaine. Un système "DC-grounded" est ainsi réalisé conformément aux normes en vigueur dans ce domaine (référence [78]).

Dans un premier temps, nous mesurons l'impédance et le coefficient de réflexion du système antenne de référence d'une Citroën C2 dans la bande FM. La figure 4.29 montre l'impédance de l'antenne fouet au dessus de la C2.

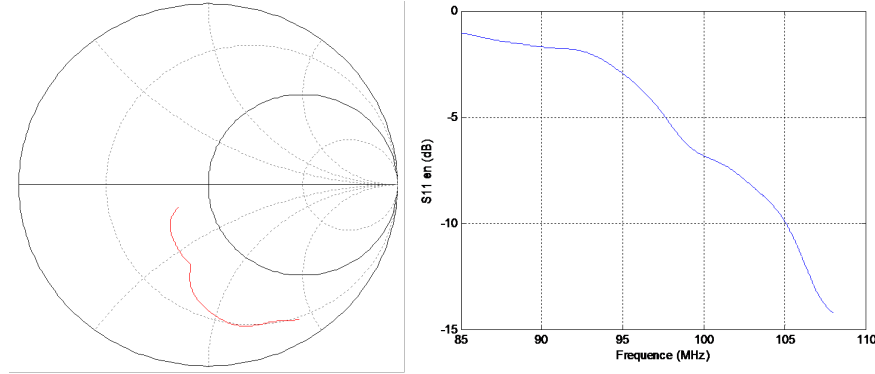


FIGURE 4.29 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion théoriques de l'antenne fouet au dessus d'une C2 dans la bande [85MHz-110MHz]

La figure 4.29 montre une impédance capacitive dont l'adaptation s'améliore lorsqu'on augmente la fréquence. L'adaptation est meilleure dans la seconde moitié de la bande mais reste tout de même acceptable pour un système de réception FM. Sur la figure 4.30, on montre l'impédance et le coefficient de réflexion théorique du car-antenna dans la bande FM.

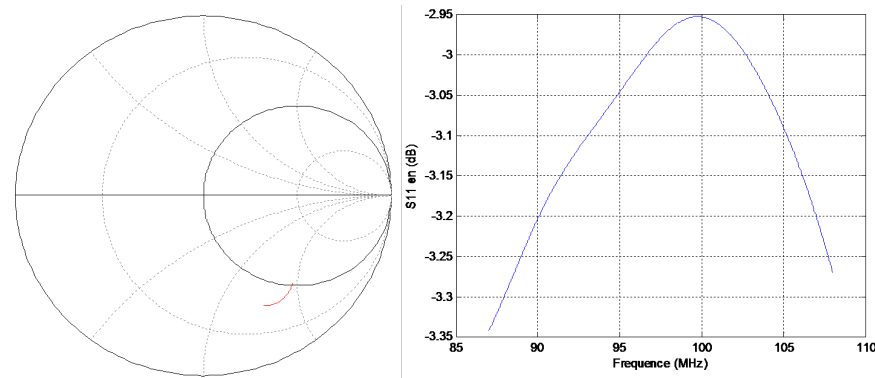


FIGURE 4.30 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion théoriques du concept car-antenna appliqué à une C2 dans la bande [85MHz-110MHz]

Dans ce cas l'impédance est également capacitive mais le système antenne de référence présente une meilleure adaptation. Néanmoins, l'impédance localisée à l'intérieur de l'abaque témoigne du rayonnement de la structure de la C2.

Dans la suite, nous avons mesuré les impédances en quelques points d'excitation de la C2. La figure 4.31 montre par exemple l'impédance mesurée de la C2 au point P4 (sur le moteur).

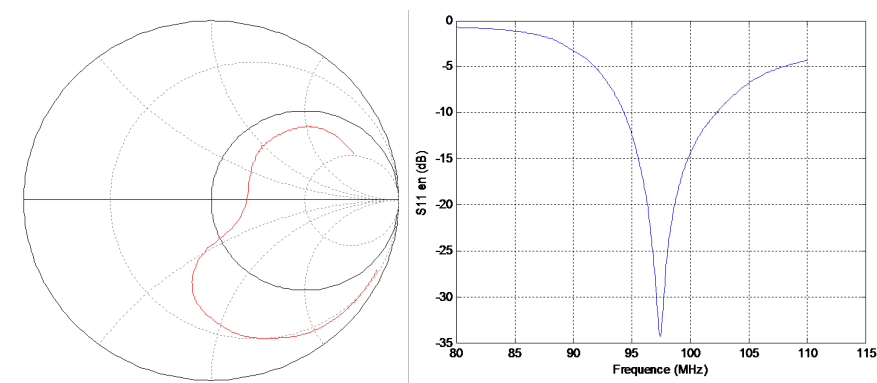


FIGURE 4.31 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion mesurées de la C2 au point P4 dans la bande [85MHz-110MHz]

Nous obtenons pour cette position, une bonne adaptation surtout à 100MHz. Cette bonne adaptation ajoutée à la directivité du diagramme expliquent le fort gain obtenu lors de la mesure du diagramme de rayonnement en ce point. Pour vérifier la variation des impédances en fonction du modèle de véhicule, nous avons mesuré l'impédance d'une Peugeot 407. La figure 4.32 montre l'impédance et l'adaptation mesurés d'un véhicule de type Peugeot 407 en un point d'excitation se situant à l'arrière du véhicule.

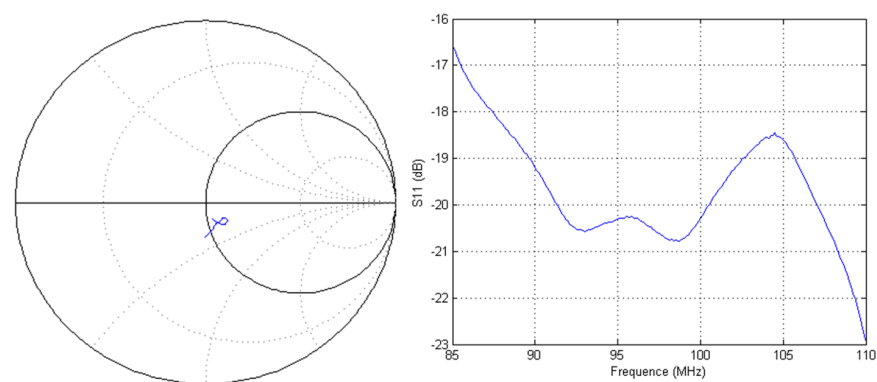


FIGURE 4.32 – Impédance de rayonnement et coefficient de réflexion mesurées d'un véhicule Peugeot 407 dans la bande [85MHz-110MHz]

La figure 4.32 montre que nous pouvons avoir des points parfaitement adaptés dans la bande FM.

4.3.4 Récapitulation

Sur la base de ces différentes mesures, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les gabarits des diagrammes de rayonnement du car-antenna varient en fonction de la position du point d'excitation.
- Le coefficient de réflexion d'un véhicule utilisé en car-antenna dépend de l'endroit où l'excitation est positionnée et du type de véhicule.
- Les diagrammes de rayonnement obtenus avec l'antenne fouet présentent moins d'ondulations que ceux du car-antenna pour tous les points d'excitations testés.
- Les gains obtenus avec l'antenne de référence sont supérieurs à ceux obtenus avec le car-antenna lorsque ce dernier présente des ondulations quasi analogues à celles de l'antenne fouet.

Suite à ces différentes observations, nous poursuivons l'exploration du concept car-antenna en faisant des mesures de niveaux reçus en bande FM à la fois en statique et en roulage.

4.4 Mesure des niveaux reçus en bande FM

4.4.1 Mesure en statique sur une Citroën C4

Afin de mieux quantifier le manque de niveau entre le système antenne de référence (fouet) et le car-antenna, nous présentons dans un premier temps les différences de niveaux reçus entre le système antenne de référence (constitué de deux antennes fonctionnant en mode diversité) d'une Citroën C4 coupé et le concept car-antenna appliqué à ce véhicule. La figure 4.33 montre les différences des niveaux reçus par les deux systèmes en bande FM. Dans cette expérimentation, la C4 est en position statique.

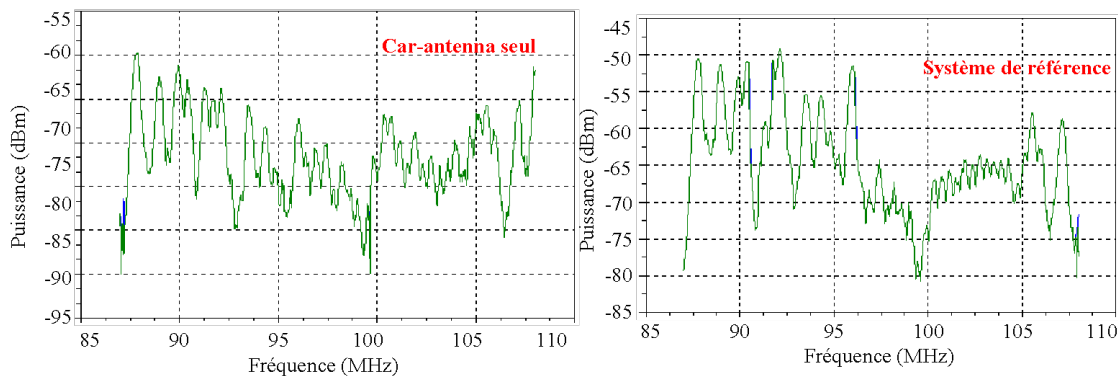


FIGURE 4.33 – Comparaison des niveaux de réception du concept car-antenna avec ceux du système antenne de référence sur une Citroën C4 coupé dans la bande [87MHz-108MHz]

La figure 4.33 montre que le car-antenna présente un niveau de réception nettement inférieur à celui du système antenne de référence. La différence est de 7dB en

moyenne mais elle peut aller jusqu'à 18dB.

Dans ce contexte, nous avons également comptabilisé le nombre de stations captées dans cette configuration. Avec le car-antenna seul, nous recevons 15 stations tandis qu'avec le système de référence, 34 stations sont reçues. Pour compenser ces écarts de niveaux, nous associons au car-antenna un amplificateur d'environ 18dB. Le nombre de stations reçues a naturellement augmenté et nous avons pu en relever 39.

Pour consolider ces mesures faites en statique sur le site de PSA-Vélizy, des mesures sont réalisées en roulage avec une Citroën C2 sur un circuit proposé par PSA Peugeot Citroën.

4.4.2 Mesure en roulage sur une Citroën C2

Les diagrammes de rayonnement dans la bande FM du véhicule de type C2 mesurés à la base de mesure de TDF ont montré un manque de niveau du concept car-antenna par rapport au système antennaire de référence. Pour évaluer les capacités de réception de signaux FM et comme pour certains véhicules l'antenne fouet est associée à un amplificateur, nous avons complété le concept car-antenna en ajoutant un amplificateur (18dB) derrière le point d'excitation.

L'objectif de la manipulation consiste à relever (toutes les 15 secondes) le spectre FM ([87MHz-107MHz]) à l'aide du car-antenna amplifié et de l'antenne fouet sur un parcours routier particulièrement exigeant déterminé à l'avance. La comparaison des niveaux des signaux reçus par les deux systèmes permettra d'évaluer la robustesse de chacun d'eux en fonction du profil du terrain.

Cette manipulation consiste à embarquer, dans un véhicule de type C2, deux analyseurs de spectre RhodeSchwartz FSH03 et FSH04. Un des analyseurs est relié à l'antenne fouet d'origine tandis que l'autre est relié à la structure métallique du véhicule à proximité du levier de vitesse (concept car-antenna). Il est à noter que seul un point d'ancrage du câble coaxial sur le véhicule a pu être testé. Le roulage est fait à partir du site de PSA Vélizy A en direction de Bièvres afin d'effectuer un parcours sur un itinéraire exigeant (succession de vallées, parcours forestier) comme le montre la représentation de l'itinéraire sur la figure 4.34.

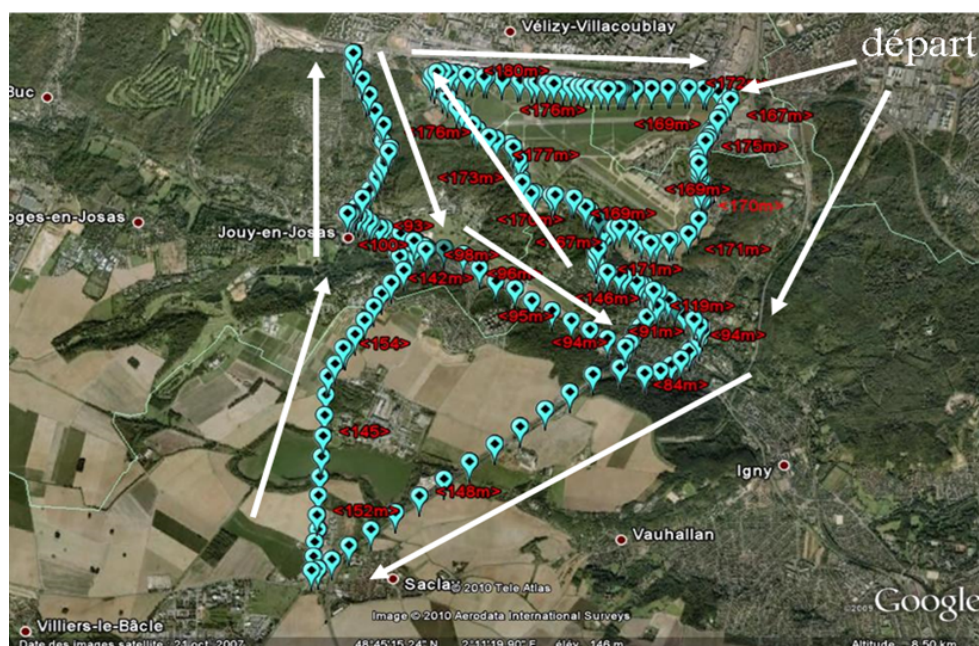


FIGURE 4.34 – Itinéraire du parcours effectué lors de l'acquisition (Image GoogleEarth)

Du fait de la durée du roulage qui est de plus d'une heure, on a enregistré 293 fichiers pour les deux systèmes antennaires. La quantité de données étant très importante, on montre dans un premier temps, quelques exemples du spectre reçu à la fois par l'antenne fouet et par le système car-antenna.

A 10h15min47s, nous avons acquis le premier enregistrement sur le site de Vélizy (Latitude 048°45' 59.196" N ; Longitude 002°12' 58.008" E). La figure 4.35 montre le niveau du signal FM pour les deux systèmes antennaires.

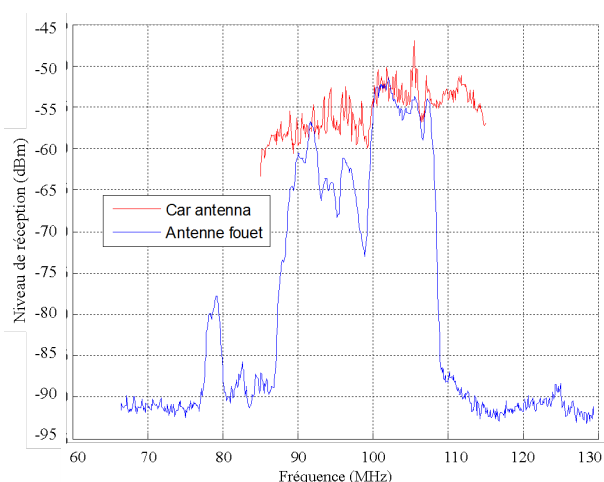


FIGURE 4.35 – Enregistrement des spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 10h15min47s ($48^{\circ}45'59.196''\text{N}$; $2^{\circ}12'58.008''\text{E}$)

On remarque qu'à cette position géographique, les niveaux des signaux reçus avec le car-antenna amplifié et l'antenne fouet sont globalement similaires. On note cependant que le niveau du signal reçu avec l'antenne fouet fluctue beaucoup plus que celui reçu avec le système car-antenna. Nous représentons sur la figure 4.36 un enregistrement fait à 10h16min01s (Latitude $48^{\circ}45'59.202''\text{N}$ Longitude $002^{\circ}12'58.008''\text{E}$).

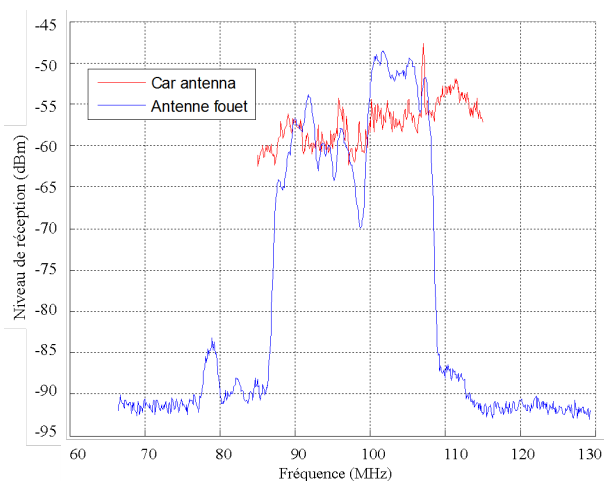


FIGURE 4.36 – Enregistrement des spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 10h16min01s ($48^{\circ}45'59.202''\text{N}$; $2^{\circ}12'58.008''\text{E}$)

Pour cet enregistrement, la remarque faite à propos de la figure 4.35 reste valable. Nous représentons sur la figure 4.37 une acquisition faite à 10h24min16s (Latitude $48^{\circ}45'37.188''\text{N}$ Longitude $002^{\circ}12'05.208''\text{E}$).

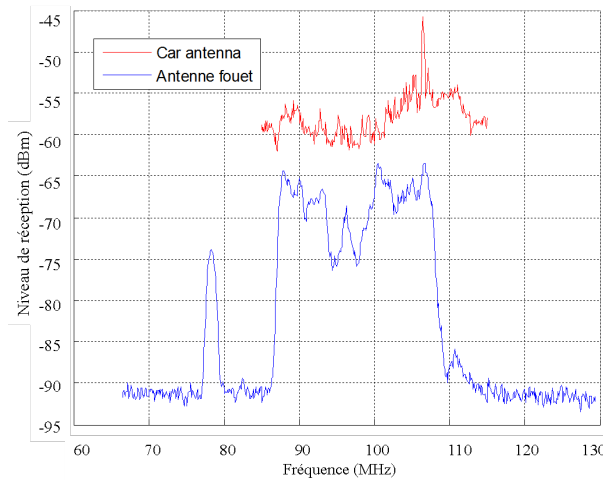


FIGURE 4.37 – Enregistrement des spectres reçus par l’antenne fouet et le car-antenna amplifié à 10h24min16s (48°45’37.188”N ; 2°12’05.208”E)

Dans ce cas, le niveau obtenu avec le car-antenna amplifié est supérieur d’environ 10dB à celui du signal reçu avec l’antenne fouet. On remarque toujours une ondulation du signal reçu avec le fouet supérieure à celle du signal reçu avec le car-antenna amplifié.

Pour compléter ces résultats, on montre le niveau reçu pour une fréquence donnée pendant tout le parcours. Cette représentation est faite pour les deux systèmes antenaires. Nous prenons les 3 fréquences suivantes : en début de bande ; 87MHz, en milieu de bande ; 100MHz et en fin de bande 107MHz. La figure 4.38 montre l’évolution du niveau de réception à 87MHz durant le parcours.

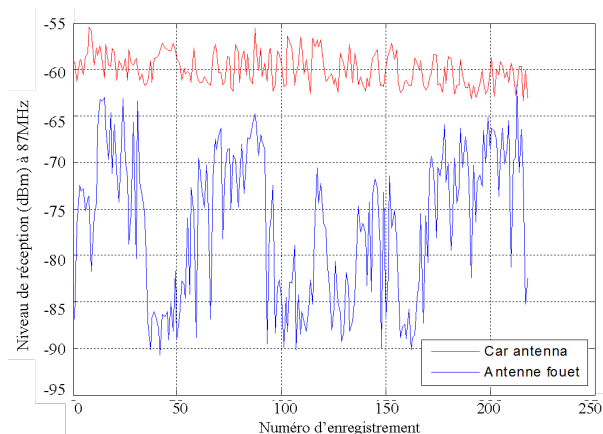


FIGURE 4.38 – Spectres reçus par l’antenne fouet et le car-antenna amplifié à 87MHz pour 220 enregistrements

La figure 4.38 montre un niveau des signaux reçus avec le car-antenna peu fluctuant tandis que le système antennaire basé sur l’utilisation du fouet présente de fortes

ondulations. Ceci est probablement dû à un nul dans le diagramme de rayonnement du fouet. Comme l'orientation du véhicule par rapport aux émetteurs FM change au cours du parcours, on peut aisément imaginer que ce défaut dans le diagramme de rayonnement influence les niveaux des signaux reçus. La figure 4.39 montre une évolution du niveau reçu durant tout le parcours à 100MHz.

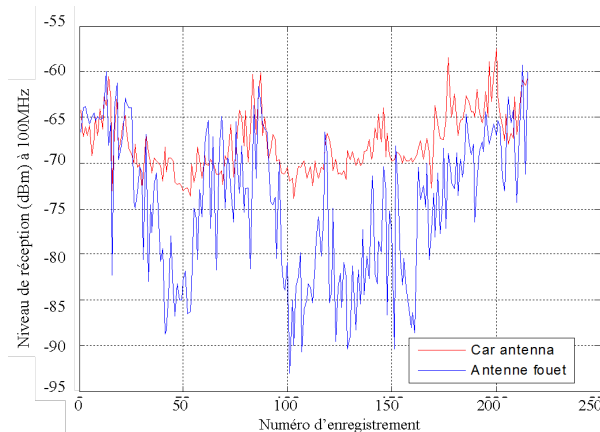


FIGURE 4.39 – Spectres reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié à 100MHz pour 220 enregistrements

Sur la figure 4.39, on observe de plus importantes fluctuations des niveaux reçus aussi bien pour le car-antenna que pour l'antenne fouet. Le car-antenna présente des ondulations allant jusqu'à 16.34dB tandis que l'antenne fouet a une ondulation de 33.8dB. Sur la figure 4.40, nous présentons les enregistrements faits à 107MHz.

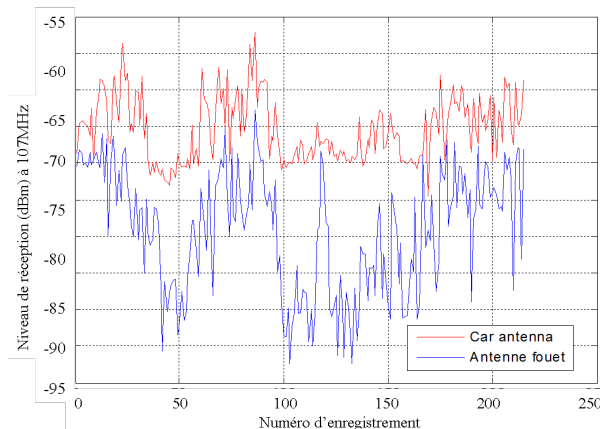


FIGURE 4.40 – Spectre des deux antennes à 107MHz pour 220 enregistrements

Dans cette représentation, nous obtenons un spectre avec moins d'ondulations pour le car-antenna que pour l'antenne fouet. Les résultats présentés sur les figures 4.35 à 4.40 montrent que les niveaux reçus à l'aide du système car-antenna amplifié sont, pour la plupart du temps, supérieurs à ceux reçus avec l'antenne fouet. Nous avons

également remarqué que les ondulations sont beaucoup plus fortes dans le cas de l'antenne de référence que dans le cas du car-antenna. La figure 4.41 montre le maximum d'ondulations sur tout le parcours pour chaque système antennaire en fonction de la fréquence.

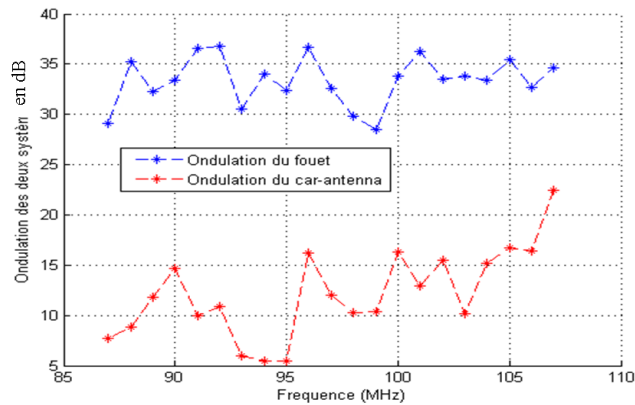


FIGURE 4.41 – Ondulations des systèmes antennaires en fonction de la fréquence

Les résultats sont particulièrement importants et montrent que l'ondulation du système car-antenna est voisine de 15dB tandis que celle du fouet est de l'ordre de 32dB.

Le parcours, constitué de vallées et de zones forestières, est choisi de façon à faire un itinéraire en forme de boucle. Cela permet d'exposer le véhicule à différentes incidences pouvant venir d'un émetteur de type FM. Cela a également permis de rencontrer des profils de terrain variables. Lorsqu'on observe l'évolution du profil du terrain en fonction du numéro d'enregistrement, on remarque que les pertes de niveaux de signaux reçus par l'antenne fouet sont plus importantes lorsque le véhicule est dans une cuvette. La figure 4.42 montre le spectre du car-antenna ainsi que celui du système antennaire de référence en fonction de la position du véhicule sur le parcours.

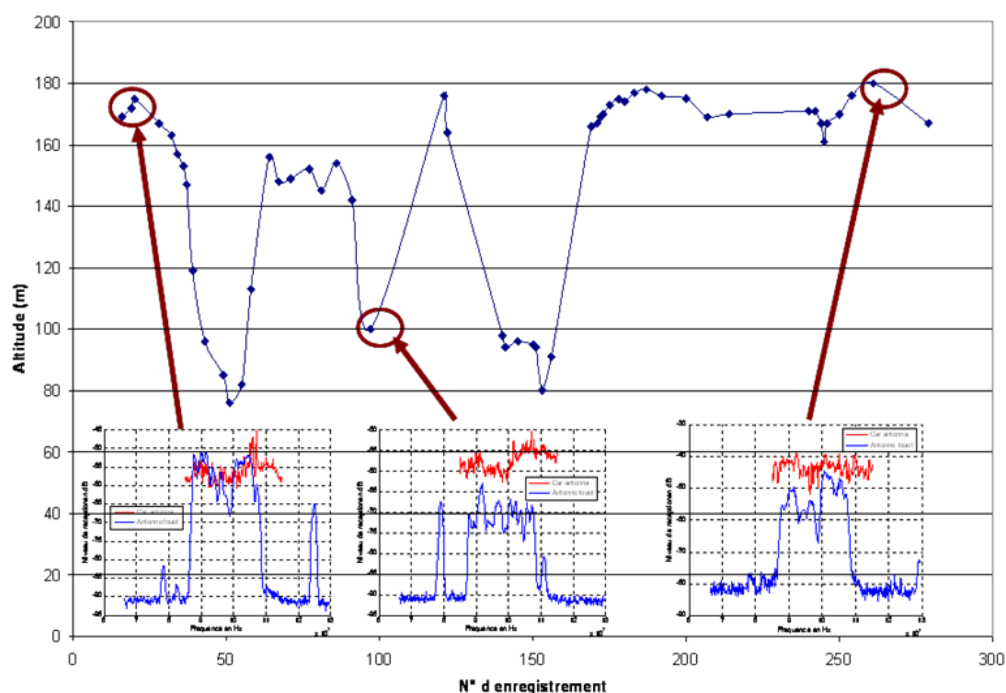


FIGURE 4.42 – Spectres du car-antenna et de l’antenne fouet pour différentes positions du véhicule sur le circuit

La figure 4.42 montre que lorsque le véhicule se trouve sur un sommet, le spectre du car-antenna amplifié et celui du système de référence présentent les mêmes niveaux de signal reçus. Par contre, lorsque le véhicule se trouve dans une vallée, le système de référence présente un niveau reçu nettement inférieur à celui du car-antenna. Ceci est dû aux gabarits des différents diagrammes de rayonnement. La figure 4.43 montre un schéma représentatif de la contribution des gabarits de l’antenne fouet en fonction de la position du véhicule. Particulièrement, à l’instant 1, une vue de dessus du véhicule est représentée pour mieux observer la contribution azimuthale.

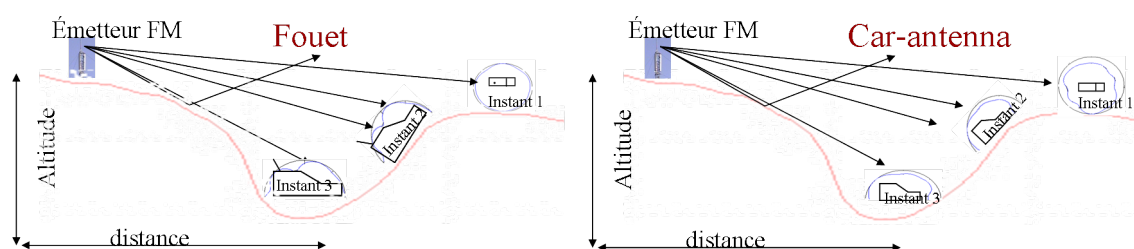


FIGURE 4.43 – Contribution des plans de coupe du diagramme de rayonnement en fonction de la position du véhicule sur le parcours

L’examen de la figure 4.43 permet d’identifier plusieurs positions du véhicule (sommet ou vallée) par rapport à l’émetteur FM. Ces positions sont à mettre en corres-

pondance avec les gabarits des diagrammes de rayonnement dans le plan de coupe (avant-arrière) à la présence ou non de trous dans ces diagrammes.

- Instant 1 : La contribution azimutale est prépondérante car l'incidence est rasant.
- Instant 2 : La combinaison des composantes (azimut et plan vertical) est à prendre en considération car ici nous sommes dans un cas intermédiaire
- Instant 3 : L'angle incident est très faible (θ proche de 0°) donc la contribution des plans de coupe verticaux (Avant-Arrière ou Droite-Gauche) est responsable de la réception

Les mesures à la base de TDF ont montré que le diagramme de rayonnement du car antenna ne présentait pas de trou axial sur le plan de coupe avant-arrière. Cette absence de trou favorise la réception dans le cas où le véhicule et l'émetteur ne sont pas en visibilité. De ce fait, pour une bonne réception FM, il serait judicieux de prendre en compte le comportement du diagramme de rayonnement sur les plans de coupe. Cette représentation montre l'avantage du car-antenna amplifié sur l'antenne de référence dans des conditions de roulage dans des zones à basse altitude.

4.5 Bilan

L'étude d'un véhicule réel a permis de consolider l'idée de faire rayonner une structure métallique telle qu'un véhicule de type automobile est raisonnable. Cette consolidation est faite à la suite de plusieurs calculs ainsi que les différentes campagnes de mesure effectuées.

L'illumination de la C2 par des ondes planes a permis de montrer les variations des courants surfaciques sur la structure du véhicule. Ces variations ont permis d'identifier des zones favorables à une réception FM. Ces zones ont pu être utilisées pour exciter le véhicule.

Nous avons également pu remarquer que :

- Les diagrammes de rayonnement issus de l'excitation directe de la structure métallique sont moins omnidirectionnelles que celui du système antenne de référence.
- Les niveaux de signaux reçus par l'antenne de référence sont au dessus de ceux reçus par le car-antenna.
- Une amplification raisonnable du système car-antenna a permis de montrer que l'on pouvait concurrencer cette antenne de référence surtout lorsque le véhicule n'est pas en visibilité avec l'émetteur.
- Les mesures de spectre sur un parcours montrent que les niveaux de réceptions du concept car-antenna présentent moins d'ondulations que ceux du système de référence. Cela est expliqué par la taille importante du car-antenna par rap-

port au fouet mais également il laisse penser que le diagramme de rayonnement du car-antenna présente en champ lointain avec moins d'ondulations qu'on le croirait.

Nous avons également constaté l'orientation du diagramme de rayonnement en fonction du point d'excitation. Cela confère au car-antenna une propriété multi-diagramme [79] que nous analyserons dans la partie qui suit.

Chapitre 5

Etude de la propriété multi-diagramme du car-antenna : Diversité de diagrammes

5.1 Introduction

Les résultats présentés dans les parties précédentes ont montré globalement que les performances du système antennaire de référence sont au dessus de ceux du concept car-antenna lorsque ce dernier n'est pas amplifié. Par contre, ces mêmes résultats ont montré que lorsque le véhicule se trouve dans une zone où l'émetteur est masqué (cuvette, végétation dense,...), une amplification raisonnable du car-antenna permet une réception d'un spectre FM largement meilleur que celle de l'antenne fouet de référence d'une C2. Par ailleurs, on a souligné de nombreuses fois la propriété multi-diagramme du car-antenna. Ceci signifie qu'en fonction de la localisation du point d'excitation, le gabarit du diagramme de rayonnement varie. Cette particularité du car-antenna a retenu notre attention et nous a conduit à étudier non plus la réception de signaux FM à l'aide d'un seul gabarit de diagramme mais plusieurs.

La diversité d'antenne en réception consiste à choisir le signal capté par 2 ou plusieurs antennes. Ces signaux sont généralement issus de différentes antennes espacées les unes des autres. Cette technique de diversité de signaux est basée sur plusieurs caractéristiques dont la polarisation ou la forme des diagrammes de rayonnement. Elle est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines tels que la téléphonie ou l'automobile qui nous concerne.

Les résultats présentés dans les deux derniers chapitres ont montré que le diagramme de rayonnement du car-antenna s'oriente en fonction du point d'excitation. Cette propriété multi-diagramme est exploitée dans le but d'améliorer la réception de signaux grâce à la technique de la diversité.

Dans un premier temps, nous rappelons le principe de réception en diversité avant de l'appliquer théoriquement sur les formes canoniques (parallélépipède et mini-car). Dans un second temps, nous présentons quelques résultats expérimentaux obtenus avec une Citroën C2 en statique puis en roulage.

5.2 Présentation du principe de la diversité

Le principe de base de la diversité d'antennes consiste à sélectionner un signal parmi plusieurs provenant d'une même source. Cette diversité se fait selon plusieurs méthodes. On peut par exemple citer la diversité spatiale, la diversité de polarisation, la diversité de diagrammes... La diversité spatiale par exemple est une technique destinée à combattre les évanouissements rapides liés au "fading" de Rayleigh. La méthode consiste à positionner deux (ou plus) antennes de réception suffisamment espacées pour que les signaux reçus par chacune d'elles subissent une statistique d'évanouissement indépendante. La sélection du meilleur signal peut s'effectuer suivant deux méthodes : la sélection instantanée ou la combinaison des différents signaux. Sur la figure 5.1, nous montrons un exemple de diversité pour deux antennes différentes.

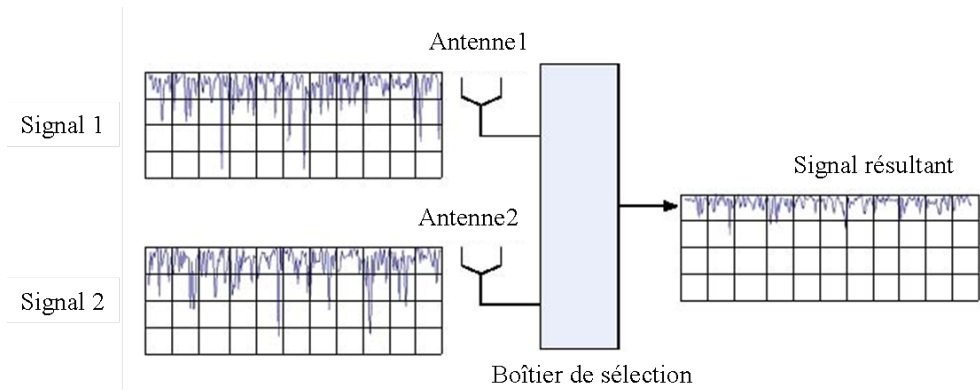


FIGURE 5.1 – Illustration de l'amélioration d'une réception par une technique de diversité d'antennes

La figure 5.1 montre que les évanouissements de signaux ("fading") observés sur les signaux d'entrée sont largement atténués à la sortie du boîtier de diversité. Dans notre cas nous appliquons le principe de la diversité de diagramme. Il faut noter que la diversité de diagramme n'est applicable que lorsque les diagrammes des différentes antennes sont différents. Elle est actuellement utilisée sur la Citroën C4 avec deux antennes : une antenne fouet et une antenne fractale. On souligne que les boîtiers de diversité utilisés dans le domaine de l'automobile peuvent permettre une sélection des signaux reçus par 4 antennes différentes.

5.3 Quelques résultats théoriques sur la diversité de diagrammes appliquée à des structures canoniques

5.3.1 Sélection d'un signal parmi plusieurs provenant des différents points d'excitation

La diversité que nous utilisons consiste à combiner deux ou plusieurs gabarits de diagramme de rayonnement différents du car-antenna. Le processus est réalisé à l'aide d'un boîtier de diversité déjà utilisé chez PSA Peugeot Citroën. Ce boîtier permet de comparer en temps réel, les niveaux des signaux reçus par chaque point excitateur et à conserver le meilleur de ces signaux.

Si on rapproche ceci à la notion de diagramme de rayonnement, la diversité peut être vue comme un diagramme de rayonnement résultant de la combinaison de deux ou plusieurs diagrammes que l'on considère décorrélés les uns par rapport aux autres. Par exemple, si l'on se place dans le plan horizontal, pour deux diagrammes de rayonnement différents, le processus consiste à choisir, pour chaque azimut (autrement dit, pour chaque angle ϕ) le diagramme dont la contribution présente le meilleur niveau. On peut ainsi construire un diagramme de rayonnement équivalent résultant. La figure 5.2 montre de manière schématique le processus de formation de diagramme de rayonnement résultant de la diversité.

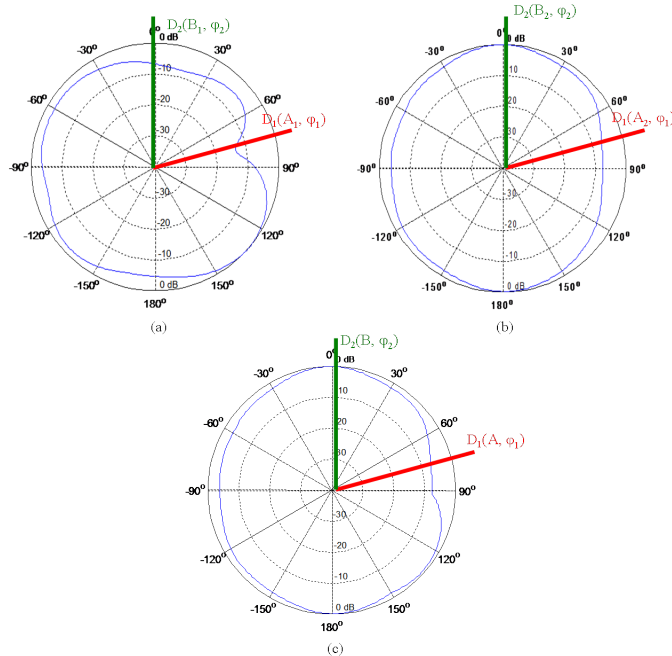


FIGURE 5.2 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) élémentaires d'une C2 pour 2 points d'excitation différents (a) et (b) et Diagramme de rayonnement résultant de la combinaison des deux diagrammes élémentaires (c)

La figure 5.2a montre un niveau d'environ $A_1 = -13\text{dB}$ (par rapport au gain max) pour l'azimut ϕ_1 et $B_1 = -8\text{dB}$ pour l'azimut ϕ_2 . La figure 5.2b montre quant à elle un niveau $A_2 = -7\text{dB}$ en ϕ_1 et un niveau $B_2 = 0\text{dB}$ pour l'azimut ϕ_2 . Le processus de recombinaison de diagrammes consiste donc à choisir, pour chaque azimut, le maximum des niveaux reçus. Pour l'azimut ϕ_1 , on choisit $A = \max(A_1; A_2)$ et pour l'azimut ϕ_2 , on choisit $B = \max(B_1; B_2)$. Comme le montre la figure 5.2c la diversité entre ces deux diagrammes a permis d'atténuer les ondulations observées sur les diagrammes de rayonnement des figures 5.2a et 5.2b.

Dans un premier temps, nous appliquons ce principe au parallélépipède présenté précédemment (chapitre 3). Le résultat de la sélection de ces diagrammes théoriques est représenté sur la figure 5.3. Nous y rappelons également les diagrammes de rayonnement issus de l'excitation du parallélépipède aux points P1 et P2.

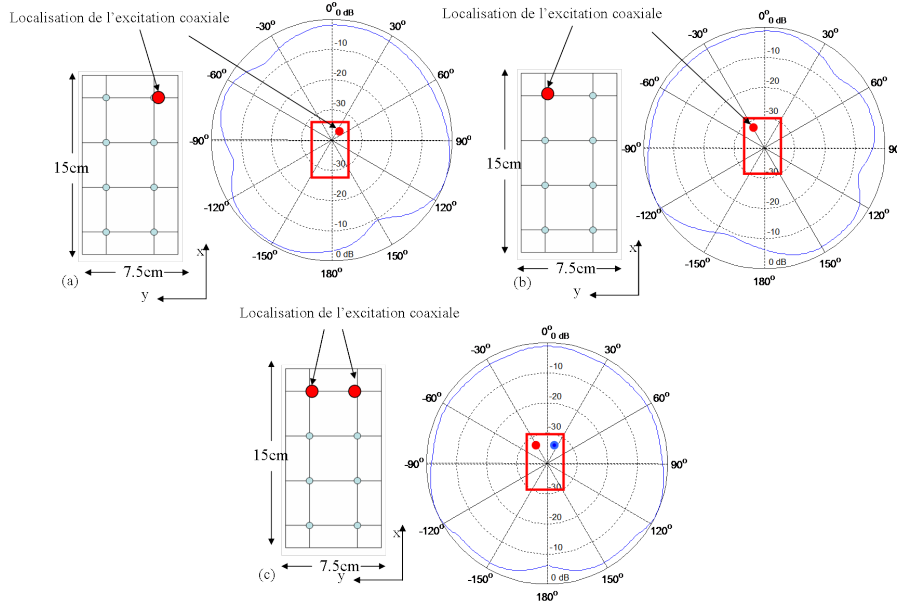


FIGURE 5.3 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) théoriques normalisés en azimut ($\theta=90^\circ$) du parallélépipède à 2GHz respectivement aux points P1 (a); P2 (b) et diagramme issu de la diversité (c) entre les points P1 ($x = 131.5\text{mm}$; $y = 18.75\text{mm}$) et P2 ($x = 131.5\text{mm}$; $y = 56.25\text{mm}$); vue de dessous

Comme nous l'avons remarqué précédemment, les figures 5.3a et 5.3b montrent que les diagrammes de rayonnement s'orientent selon la localisation du point exciteur. Les diagrammes présentent chacun plusieurs trous avec un maximum d'ondulation de l'ordre de 10dB. La figure 5.3c présente un diagramme de rayonnement issu du processus de diversité. Il est quasi omnidirectionnel avec une ondulation d'environ 6dB. Cette ondulation n'est visible que sur une ouverture angulaire très réduite contrairement aux multiples ondulations obtenues lors de l'excitation en un seul point.

Nous avons également appliqué cette technique de diversité au mini-car muni d'ouvertures. Les points d'excitation choisis sont également $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) et $P2$ ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$). La figure 5.4 montre le diagramme de rayonnement issu de la diversité entre ces deux points excitateurs ainsi que les diagrammes obtenus pour chaque point.

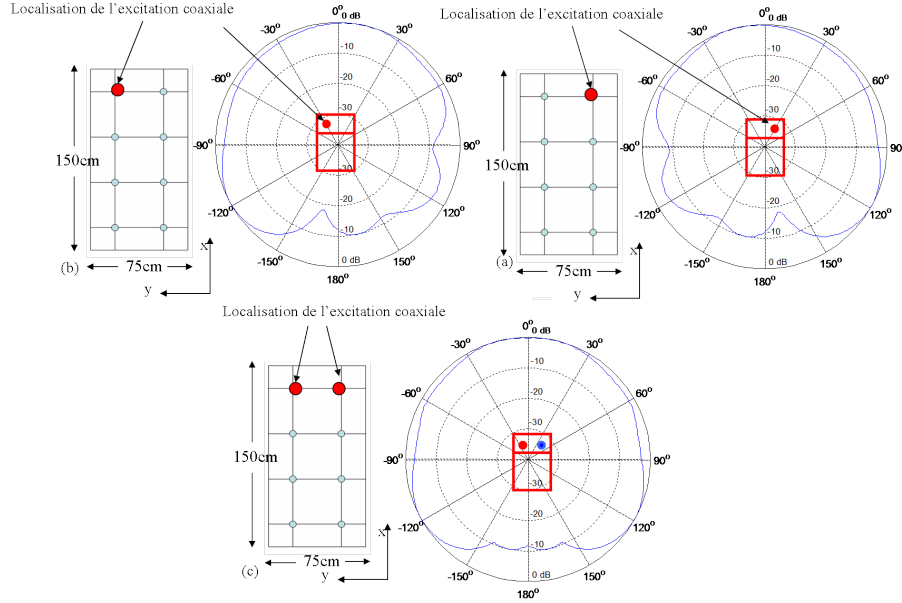


FIGURE 5.4 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) théoriques normalisés en azimut ($\theta=90^\circ$) du mini-car à 200MHz respectivement aux points $P1$ (a) ; $P2$ (b) et diagramme issu de la diversité (c) entre les points $P1$ ($x = 1312.5mm$; $y = 187.5mm$) et $P2$ ($x = 1312.5mm$; $y = 562.5mm$) ; vue de dessous

Comme nous l'avons déjà vu, les figures 5.4a et 5.4b montrent les diagrammes de rayonnement issus de l'excitation du mini-car muni d'ouvertures respectivement aux points $P1$ et $P2$. Comme dans le cas du parallélépipède, chacun de ces deux diagrammes présente de nombreuses ondulations allant jusqu'à 15dB. La figure 5.4c quant à elle montre le diagramme de rayonnement issu de la diversité entre les points excitateurs $P1$ et $P2$. Elle présente un diagramme quasi omnidirectionnel avec une ondulation ponctuelle de 12dB autour de $\phi = 180^\circ$. même si les ondulations dans les diagrammes de rayonnement issus du processus de diversité sont toujours assez importantes, on montre tout de même une amélioration de la couverture d'un diagramme résultant d'un processus de diversité par rapport à celle d'un diagramme obtenu avec un seul point excitateur.

5.3.2 Amélioration du dispositif : Pondération de chaque diagramme en amplitude

Dans la partie précédente, nous avons montré que l'utilisation de plusieurs points d'excitation permet d'limiter les ondulations présentes dans les diagrammes de rayonnement issus de l'excitation de la structure métallique en un seul point. Cependant, nous notons également que cette technique ne fonctionne que lorsque les niveaux des diagrammes de rayonnement des différents points sont comparables. De ce fait, un diagramme présentant moins d'ondulations mais de niveau faible ne peut être utilisé pour réaliser une diversité de diagramme. A titre illustratif, sur la figure 5.5, on montre deux diagrammes de rayonnement ayant des gabarits complémentaires mais de niveaux très différentes.

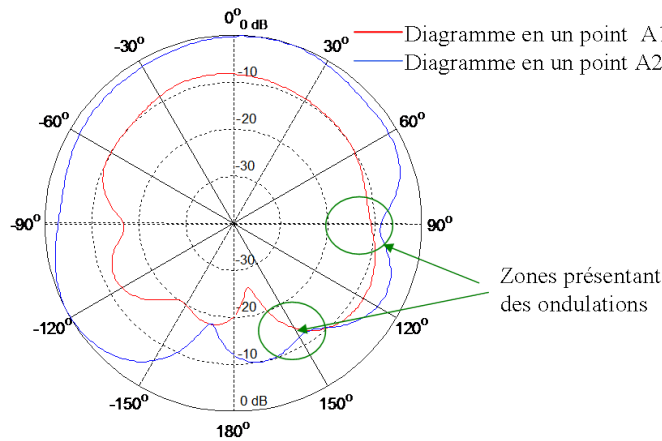


FIGURE 5.5 – Schéma de principe illustrant le besoin de la pondération

La figure 5.5 montre que même si les gabarits des diagrammes de rayonnement sont complémentaires, l'application de la diversité telle que nous l'avons décrite ne permettra pas de minimiser les ondulations présentes sur les deux diagrammes de rayonnement.

Pour palier ce problème, une pondération en amplitude des diagrammes de rayonnement peut être réalisée. L'objectif de cette opération étant de limiter les ondulations, on choisit des diagrammes complémentaires et on les amplifie un à un avec différents gains de manière à avoir des niveaux comparables avant de procéder à la combinaison. Cela consiste à pondérer en amplitude chaque signal d'entrée selon le niveau du diagramme de rayonnement correspondant. Autrement dit, le gain de l'amplificateur de chaque signal d'entrée est optimisé en fonction du diagramme de rayonnement correspondant. Cette opération peut être faite à l'aide d'une fonction d'optimisation. Parmi ces fonctions nous pouvons citer les méthodes d'optimisation de type min-max, gradient d'indice, algorithmes génétiques... La figure 5.6 montre le schéma de principe du fonctionnement de cette forme de diversité.

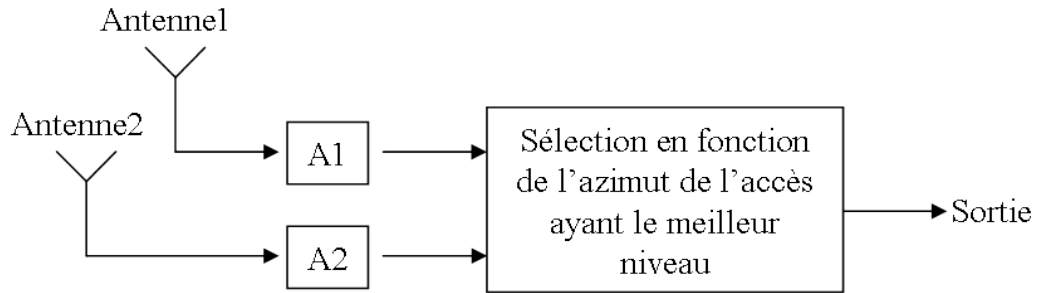


FIGURE 5.6 – Schéma de principe du fonctionnement de la diversité pondérée
 – A_i : Amplification à la voie d'entrée i

Rappelons que le principe de la pondération consiste à sélectionner deux ou trois points sources selon la complémentarité des gabarits de leurs diagrammes de rayonnement respectifs. Ensuite, chacun des diagrammes est amplifié en fonction de son niveau avant d'attaquer le boîtier de diversité comme le montre la figure 5.6. En effet, dans un premier temps, nous mesurons les diagrammes de rayonnement de plusieurs points excitateurs et en fonction de la complémentarité des gabarits des diagrammes de rayonnement de chaque point, on les sélectionne.

A titre illustratif, ce principe est appliqué aux mesures faites à la base de TDF. L'étude présentée ici est essentiellement théorique mais elle se base sur des diagrammes de rayonnement expérimentaux. Rappelons que les diagrammes de rayonnement sont mesurés à trois fréquences de la bande FM : 87MHz, 100MHz et 107MHz. Sept points de mesure ont été pris sur la structure métallique du véhicule (C2) lors de l'expérimentation faite à la base de TDF. Nous choisissons les trois points d'excitation suivants pour illustrer la pondération.

- Au contact avec le support du levier de frein à main avec la structure du véhicule ($P1$)
- Au point d'accroche de la ceinture arrière de sécurité à gauche ($P2$)
- Derrière la console auto radio ($P7$)

Le choix des amplifications des différentes voies se base sur une comparaison de la valeur du signal prélevé auprès de chaque point d'excitation avec un seuil. Ce dernier est pris en fonction de la valeur du niveau de signal capté par l'antenne de référence (fouet). La formulation mathématique d'un tel système de sélection s'écrit de la façon suivante :

$$\max(\alpha P_i; \beta P_j; \delta P_k; \dots) = Ref$$

- $\alpha, \beta, \delta, \dots$: coefficients de pondération (en linéaire)
- $P_i, P_j, P_k \dots$: niveaux de signal reçu à l'entrée du boîtier (en linéaire).
- Ref : seuil d'ondulation autorisé (en linéaire).

La détermination des coefficients passe par une optimisation mathématique et plusieurs méthodes sont préconisées. La figure 5.7 montre le diagramme de rayonnement issu de la diversité pondérée grâce à la méthode des gradients appliquée aux points P1, P2, et P7 à 107MHz ainsi que les diagrammes de rayonnement de chacun de ces points d'excitation.

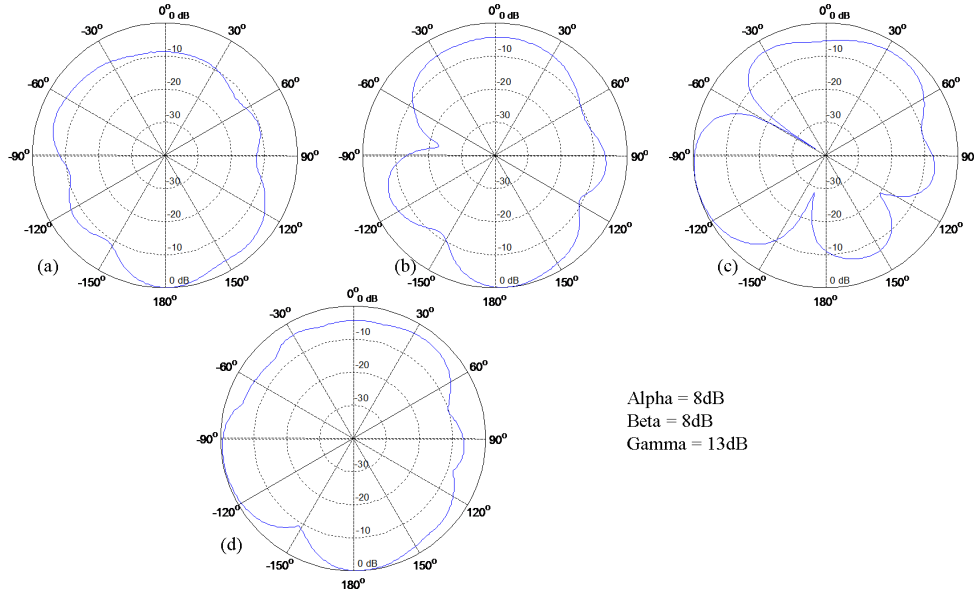


FIGURE 5.7 – Diagrammes de rayonnement (E_θ) normalisés et mesurés en azimuth aux points d'excitation P1 (a), P2 (b) et P7 (c) (mesure TDF) ainsi que celui issu de la diversité (d) pondérée appliquée à ces points à 107MHz.

Le même travail a été mené à 87MHz et à 100MHz et les résultats restent identiques à ceux présentés sur la figure 5.7. Cette figure montre également que la diversité pondérée a permis d'obtenir une ondulation autour de 10dB tandis que les voies élémentaires présentent des ondulations allant au delà de 30dB.

Pour justifier cette méthode, on montre sur la figure 5.8 une comparaison des diagrammes de rayonnement de la diversité pondérée et du système antennaire de référence à 107MHz.

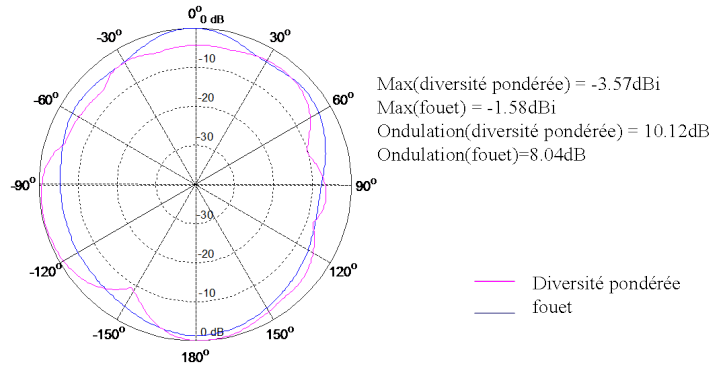


FIGURE 5.8 – Comparaison du diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé en azimut ($\theta=90^\circ$) de la diversité pondérée appliquée à la C2 aux points P1, P2 et P7 (mesure TDF) avec celui de l'antenne fouet FM à 107MHz

Même si l'ondulation de l'antenne fouet reste inférieure à celle de la diversité pondérée, nous montrons qu'avec une optimisation, la diversité pondérée peut permettre de minimiser les ondulations présentes dans les diagrammes de rayonnement du car-antenna au point de concurrencer l'antenne fouet de référence comme le montre la figure 5.9.

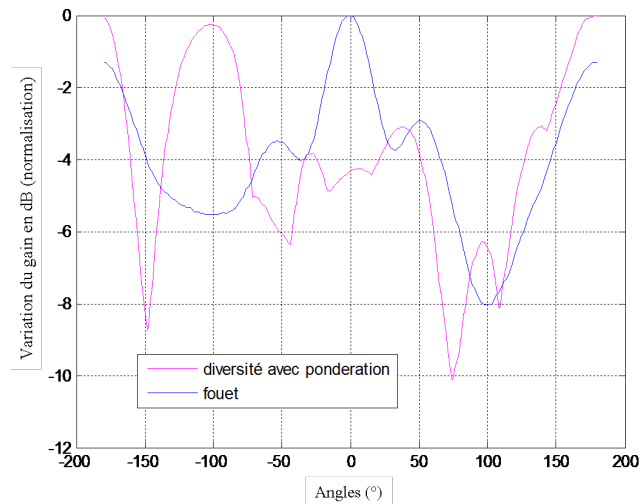


FIGURE 5.9 – Représentation cartésienne du diagramme de rayonnement (E_θ) normalisé en azimut ($\theta=90^\circ$) de la diversité pondérée appliquée à la C2 aux points P1, P2 et P7 (mesure TDF) avec celui de l'antenne fouet FM à 107MHz

La figure 5.9 montre que l'ondulation du diagramme de rayonnement de la diversité pondérée ne dépasse celle du fouet que sur des ouvertures angulaires très réduite.

Nous avons utilisé la méthode des gradients pour déterminer les coefficients de pondération. Néanmoins, cette détermination de coefficients peut être obtenue par le biais d'autres algorithmes plus complets tels que les algorithmes génétiques.

5.4 Etude expérimentale de la diversité en roulage : Enregistrement du spectre FM

5.4.1 Description et objectifs

Dans cette expérimentation, nous avons connecté deux sondes coaxiales au niveau du siège arrière d'une Citroën C2. Deux amplificateurs de 6dB sont utilisés pour amplifier chaque voie. Ensuite, les deux extrémités des câbles sont raccordées à un boîtier de sélection (boîtier de diversité). La sortie du boîtier est reliée à un analyseur de spectre (Rohde & Schwarz FSH4). En parallèle, les signaux reçus par l'antenne de référence sont recueillis grâce à un deuxième analyseur de spectre (Rohde & Schwarz FSH3). Les deux analyseurs sont reliés à un système d'acquisition (ordinateur portable).

5.4.2 Présentation et interprétation des résultats

La figure 5.10 montre le circuit accidenté parcouru.

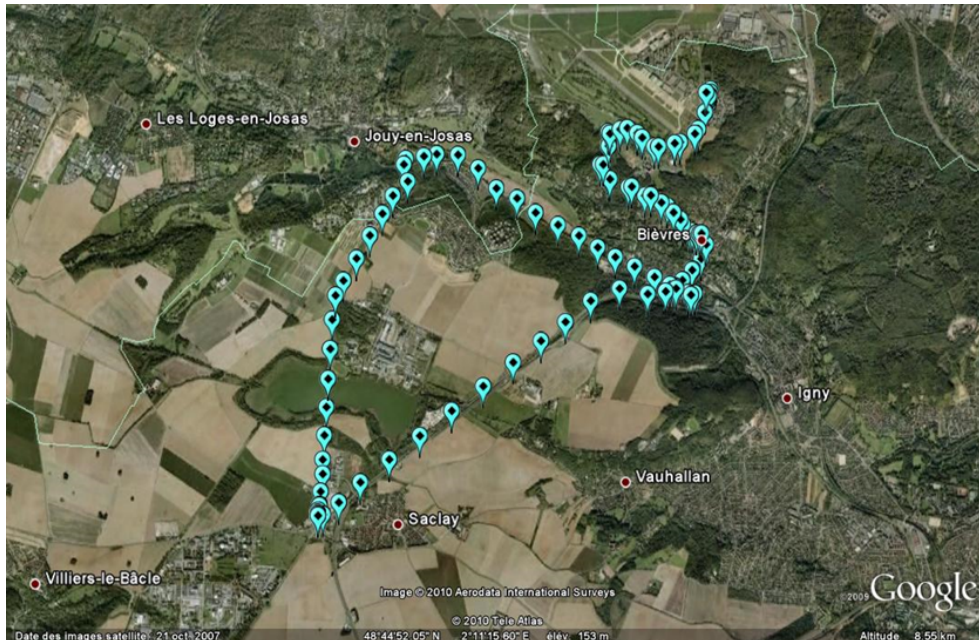


FIGURE 5.10 – Itinéraire du chemin parcouru lors de l'acquisition du spectre FM en mode diversité (image GoogleEarth)

Comme nous le constatons, le parcours effectué est identique à celui utilisé lors de l'enregistrement du spectre FM pour un seul point d'excitation. C'est un parcours

accidenté qui fait une boucle de façon à exposer l'antenne à toutes les directions d'arrivée des ondes émises par les émetteurs FM à proximité.

Nous présentons sur la figure 5.11 le premier enregistrement effectué sur le site de Vélizy.

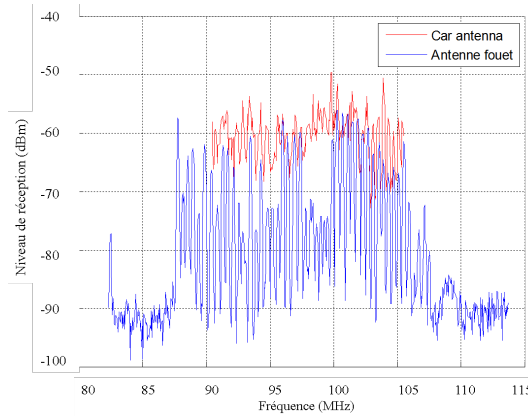


FIGURE 5.11 – Enregistrement de spectre du car-antenna amplifié en mode diversité et de celui du fouet sur le site de PSA-Vélizy ($48^{\circ}45'59.370''N$; $2^{\circ}12'57.300''E$)

La figure 5.11 montre un spectre du car-antenna voisin de celui de l'antenne de référence. Ensuite nous avons représenté sur la figure 5.12 un exemple d'enregistrement acquis dans une cuvette (l'émetteur est dans ce cas masqué).

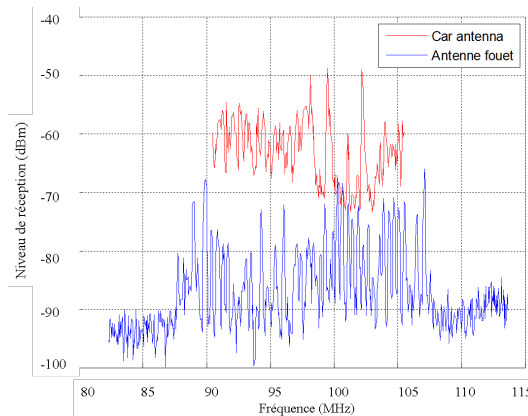


FIGURE 5.12 – Enregistrement de spectre du car-antenna amplifié en mode diversité et de celui du fouet sur la descente de Bièvres ($48^{\circ}45'17.742''N$; $2^{\circ}12'53.676''E$)

Dans cette localité à basse altitude, l'émetteur n'est pas visible par les deux systèmes antennaires. Le faible niveau reçu par l'antenne de référence est dû au masquage. Par contre, du fait de la taille importante de la structure du véhicule, le car-antenna parvient à recevoir comme dans des conditions de réception optimale. D'autre part,

nous avons montré dans le cas du roulage avec un seul point d'excitation que lorsque le véhicule se retrouve dans une cuvette, la contribution du diagramme de rayonnement dans le plan de coupe avant-arrière est prépondérante par rapport à celle du diagramme azimutal. L'antenne fouet présentant un trou dans le plan de coupe avant-arrière, voit son niveau de réception s'affaiblir.

Au vu des variations des niveaux selon qu'on se trouve dans une cuvette ou un sommet, nous avons, comme dans le cas du roulage avec un seul point d'excitation, tracé l'évolution des niveaux de quelques fréquences au cours du parcours. Sur la figure 5.13, on montre les variations des niveaux reçus à 91MHz (car pour des raisons de synchronisation, l'enregistrement du spectre du car-antenna a commencé à 91MHz et non à 87MHz).

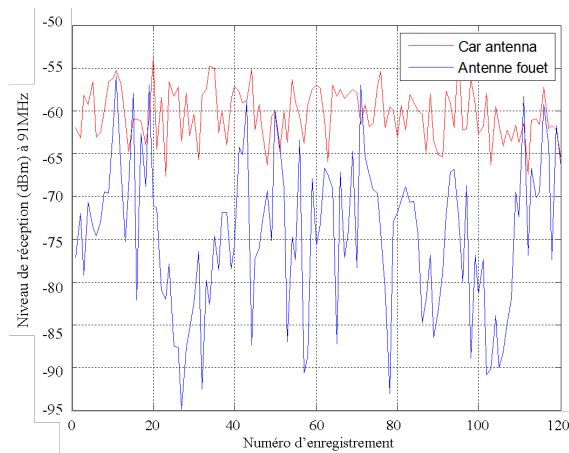


FIGURE 5.13 – Niveaux reçus par l'antenne fouet et le car-antenna amplifié de 6dB en mode diversité à 91MHz pour 120 enregistrements

Comme dans le cas du roulage avec un seul point d'excitation, les niveaux des signaux reçus par le car-antenna présentent peu de fluctuations contrairement à ceux reçus par l'antenne de référence. Sur la figure 5.14, on montre les niveaux reçus par l'antenne fouet et le car-antenna en mode diversité amplifié (de 6dB sur chaque voie) à la fréquence 100MHz.

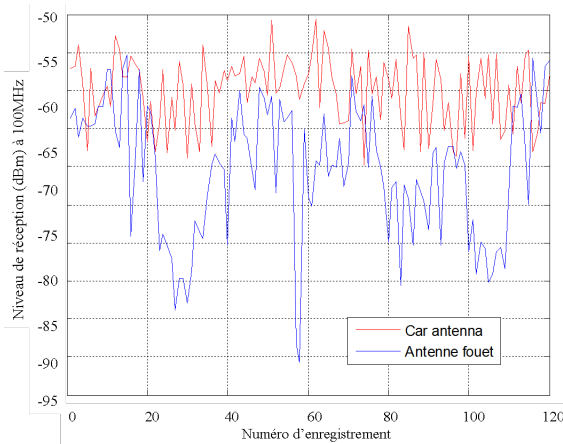


FIGURE 5.14 – Niveaux reçus par l’antenne fouet et le car-antenna amplifié de 6dB en mode diversité à 100MHz pour 120 enregistrements

La tendance observée à 91MHz se confirme ici. En effet, comme expliqué lors du roulage sans diversité, la taille importante du car-antenna permet de recevoir des niveaux de signal similaires que l’on soit dans une cuvette ou un sommet tandis que l’antenne fouet, à certains endroits du circuit, présente des niveaux de signal très faibles. Cela est dû, d’autre part aux formes des diagrammes de rayonnement des deux systèmes antennaires.

La diversité appliquée au car-antenna est amplifiée d’en moyenne 6dB (sur chaque voie). Par ailleurs dans le chapitre précédent, nous avons montré des résultats avec une simple connexion à la structure d’une C2. Cette opération était réalisée avec un amplificateur de 19dB. Sur la figure 5.15, nous montrons deux enregistrements faits sur le site de Vélizy Villacoublay (au même endroit). Le premier est fait avec le car-antenna amplifié de 6dB tandis que le second est fait avec le car-antenna en mode diversité amplifié de 6dB par voie. Nous précisons que le roulage en car-antenna simplement amplifié de 6dB n’est en réalité pas effectué ; nous avons pris l’enregistrement fait avec l’amplification de 19dB auquel nous avons soustrait 13dB.

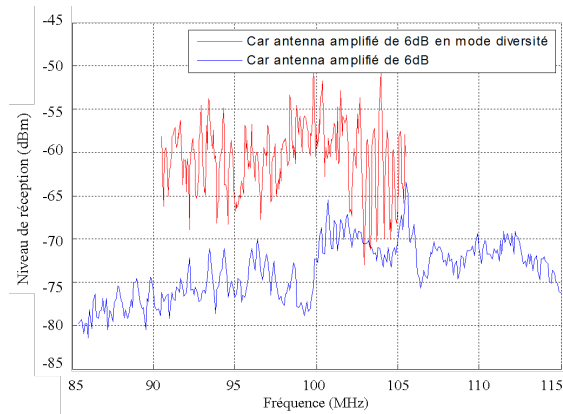


FIGURE 5.15 – Comparaison des spectres FM reçus sur le site de PSA-Vélizy du car-antenna simplement amplifié (6dB) et de celui en mode diversité amplifié de 6dB ($48^{\circ}45'59.370''N$; $2^{\circ}12'57.300''E$)

La figure 5.15 montre qu'en appliquant la diversité, on peut diminuer le gain de l'amplification à utiliser pour une réception FM avec le concept car-antenna.

Nous avons par la suite évalué l'ondulation de chaque système comme dans le cas du roulage sans diversité. La figure 5.16 montre l'évolution de l'ondulation en fonction de la fréquence.

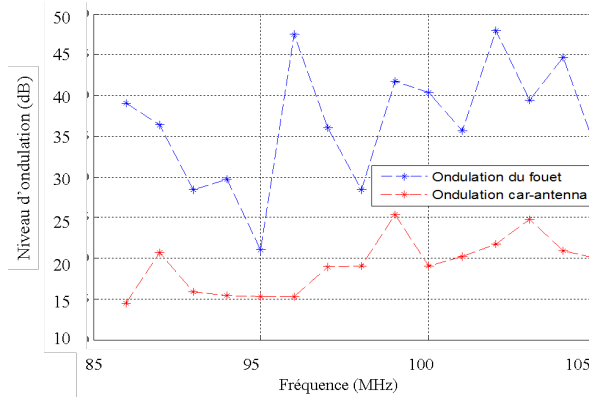


FIGURE 5.16 – Ondulations des deux systèmes antennaires en fonction de la fréquence

Comme dans le cas du roulage sans diversité, le car-antenna présente moins d'ondulations que le système antenne de référence (en moyenne 19dB pour le car-antenna et 36dB pour le fouet). Cela est analogue aux observations faites sur l'enregistrement du spectre. En effet, lorsque le véhicule se trouve dans une cuvette, la contribution azimutale du diagramme de rayonnement ne permet pas une réception puisque l'angle incident du signal venant de l'émetteur est faible. Les contributions des plans de coupe sont donc prédominantes. Les mesures de TDF ont montré des trous dans l'axe du diagramme de rayonnement de l'antenne de référence. Ces trous sont responsables

des pertes de niveau présentes sur le spectre reçu par l'antenne fouet. Par contre, les diagrammes de rayonnement du car-antenna ne présentent pas de trous dans l'axe ; cela favorise la réception dans des conditions où le véhicule se trouve dans une vallée.

Comme dans le cas du roulage simple nous avons observé l'évolution du spectre en fonction du profil du terrain. La figure 5.17 montre le spectre de l'antenne fouet et celui du concept car-antenna en mode diversité en fonction de la position du véhicule sur le circuit.

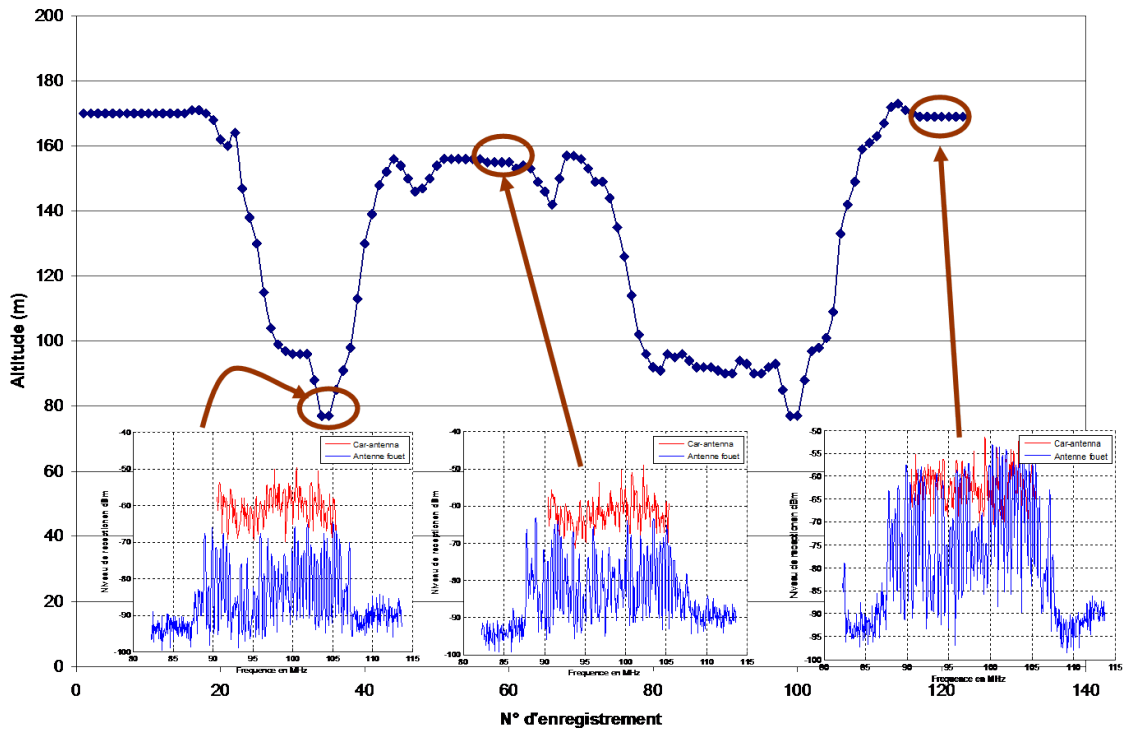


FIGURE 5.17 – Spectres du car-antenna en mode diversité et de l'antenne fouet pour différentes positions du véhicule sur le circuit

La figure 5.17 montre que le niveau du signal reçu varie en fonction de la position du véhicule sur le parcours. Elle rejoint les résultats observés lors du roulage simple (sans diversité). Autrement dit, lorsque le véhicule sur un sommet (en visibilité avec l'émetteur FM), les deux systèmes antennaires présentent des niveaux comparables. Par contre, lorsque ce dernier se trouve dans une vallée (émetteur FM invisible), le niveau du signal reçu par le car-antenna est nettement au dessus de celui reçu par l'antenne de référence (fouet).

5.5 Bilan

La diversité permet de sélectionner un signal utile parmi tant d'autres pouvant venir de la structure métallique d'un véhicule. Cette étude est menée dans un premier temps sur des formes canoniques telles qu'un parallélépipède. Elles ont montré que cette technique permet de diminuer considérablement les ondulations d'un diagrammes de rayonnement.

Dans un second temps, des études sont réalisées à partir de quelques points d'excitation d'un véhicule réel (typiquement C2), ce qui a permis de valider la théorie présentée avec les formes simples. Egaleme nt, une optimisation est présentée afin d'améliorer le concept.

Enfin, au delà des mesures de diagramme de rayonnement faites en statique, les mesures de spectres sur un circuit accidenté ont montré qu'avec la technique de diversité, le besoin d'amplification peut être relativisé.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués dans le cadre d'une coopération entre l'Université de Rennes 1 et le groupe PSA Peugeot Citroën. Ils concernent l'exploration et la mise en œuvre du concept "car-antenna" qui consiste à faire rayonner une structure métallique de grandes dimensions excitée par une sonde coaxiale. L'essentiel du travail a été réalisé en bande FM française ([87MHz-107MHz]).

Dans un premier temps, nous avons réalisé une synthèse bibliographique aussi complète que possible qui nous a permis de répertorier les antennes couramment utilisées dans l'automobile. Cette synthèse a concerné toutes les applications du domaine automobile. Nous avons également montré les technologies émergentes et les antennes associées ayant fait l'objet d'applications automobiles. Cet état de l'art nous a permis d'avoir une vue globale des systèmes antennaires utilisés dans l'automobile. Elle nous a également permis de mieux situer nos objectifs par rapport à l'existant et de nous tourner délibérément vers le concept "car-antenna" jusque là peu étudié.

Puis, pour donner une consistance théorique au concept "car-antenna" et pour nous mettre dans des conditions de calcul raisonnables, nous avons, dans un premier temps, travaillé sur des structures simples dont les dimensions restent grossièrement celles d'un véhicule à dimensions réduites (échelle $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{20}$). Nous avons étudié le comportement d'un parallélépipède représentant une Citroën C2 à l'échelle $\frac{1}{20}$ et un mini-car proche d'une C2 à l'échelle $\frac{1}{2}$. Pour prendre en compte que le besoin de PSA se situe prioritairement en bande FM, le facteur d'échelle des structures métalliques étudiées par rapport aux dimensions d'un véhicule de type C2 a été reproduit sur les bandes de fréquence où ont été réalisés les calculs. Autrement dit, le parallélépipède à l'échelle $\frac{1}{20}$ et le mini-car à l'échelle $\frac{1}{2}$ ont été étudiés respectivement à 2GHz et à 200MHz. Cette étude théorique a permis d'identifier les zones des structures métalliques où les distributions de courant ne sont ni trop fortes ni trop faibles et de les choisir comme points d'excitation de la structure métallique lorsque l'on cherche à la faire rayonner. Sur ces bases, nous avons alors calculé le diagramme de rayonnement de ces structures métalliques de dimensions réduites. Il a été mis en évidence, aussi bien théoriquement qu'expérimentalement, que le gabarit du diagramme

de rayonnement variait en fonction de la localisation du point d'excitation.

Dans un troisième temps, nous avons profité des résultats précédents en les appliquant à un véhicule de dimensions réelles et principalement à une Citroën C2. Malgré les temps de calcul prohibitifs, nous avons pu calculer les diagrammes de rayonnement théoriques de la C2 excitée par une sonde coaxiale. Ceci nous a, une nouvelle fois, permis de mettre en évidence la variation du gabarit du diagramme de rayonnement en fonction du point d'excitation. Fort de cette analyse théorique, nous sommes passés à une étude expérimentale approfondie du concept car-antenna sur la Citroën C2. Les mesures du diagramme de rayonnement ont été réalisées en 3D (3 dimensions). Ceci a permis de valider la modification du diagramme de rayonnement en fonction de la localisation du point exciteur. Les différents diagrammes de rayonnement ont été comparés à ceux de l'antenne fouet de référence actuellement utilisée sur la C2. Il en ressort que les diagrammes de rayonnement du fouet présentent moins d'ondulation que ceux du car-antenna et il faut surtout noter qu'il existe des écarts de niveaux substantiels (10dB) en faveur de l'antenne fouet. Malgré ces écarts de niveaux, nous avons poursuivi notre étude en faisant des enregistrements du spectre FM en roulage en utilisant d'une part l'antenne fouet de référence et d'autre part le car-antenna. Pour combler les écarts de niveaux, un amplificateur de 18dB est associé au car-antenna. Les mesures ont été réalisées sur un parcours routier particulièrement accidenté d'une cinquantaine de kilomètres choisi par PSA Peugeot Citroën. Les résultats sont très encourageants puisqu'ils ont montré que le car-antenna associé à un amplificateur devient tout à fait concurrentiel de l'antenne fouet de référence, en particulier dans les zones où les émetteurs ne sont pas en visibilité directe avec le véhicule. En effet, dans ces zones particulièrement critiques et contrairement à l'antenne fouet, l'absence de trous sur les plans de coupe verticaux du diagramme de rayonnement du car-antenna offre une meilleure possibilité de recevoir des signaux issus des réflexions multiples.

Dans le dernier chapitre, on exploite les propriétés de modification des gabarits du diagramme de rayonnement en fonction de la localisation du point exciteur du car-antenna pour proposer un système rayonnant qui fonctionne en mode diversité de diagrammes. L'étude a été essentiellement expérimentale et a montré que cette technique permet de réduire l'amplification associée au car-antenna. Le système car-antenna en mode diversité a été testé en roulage sur un parcours analogue à celui fréquenté pour les essais de roulage avec un seul point d'excitation. Dans ce cas également, le système car-antenna s'est montré concurrentiel par rapport à l'antenne fouet de référence en particulier dans les zones accidentées.

Ces travaux rassemblent les éléments de base du concept car-antenna. Si on a montré à travers de nombreuses études expérimentales que ces travaux peuvent avoir une suite au niveau industriel, il reste néanmoins des points à approfondir d'un point de vue théorique et surtout il demeure essentiel d'étendre le concept car-antenna en

émission et à d'autres porteurs.

Sur le plan théorique, le principal effort consiste à optimiser le choix de la zone d'excitation en essayant de mettre en œuvre un modèle théorique permettant de choisir un point par exemple à l'intérieur du véhicule et ceci dans le but d'essayer de trouver des zones autres que le fond de châssis du véhicule. Egalement, il faut noter que l'étude est à mener pour chaque nouveau véhicule.

L'extension du concept car-antenna à des applications différentes de la FM ne pose a priori pas de problèmes majeurs mais doit être expérimentée de la même manière que la FM l'a été faite dans ces travaux.

Si l'on admet que le principe du car-antenna est valide, on imagine également de nombreuses applications de structures métalliques rayonnantes telles que les conteurs, les trains, les bateaux...

Jusqu'à présent, nous n'avons présenté que des applications à la réception mais les premiers essais préliminaires que nous avons réalisés en émission nous autorisent à penser que des travaux peuvent être entrepris. Seuls des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent venir contrarier de tels développements.

Annexes

Annexe A

Distribution des courants suite à une illumination du mini-car par une onde plane en espace libre

A.1 Illumination du mini-car à 630MHz

– Onde plane venant de l'arrière

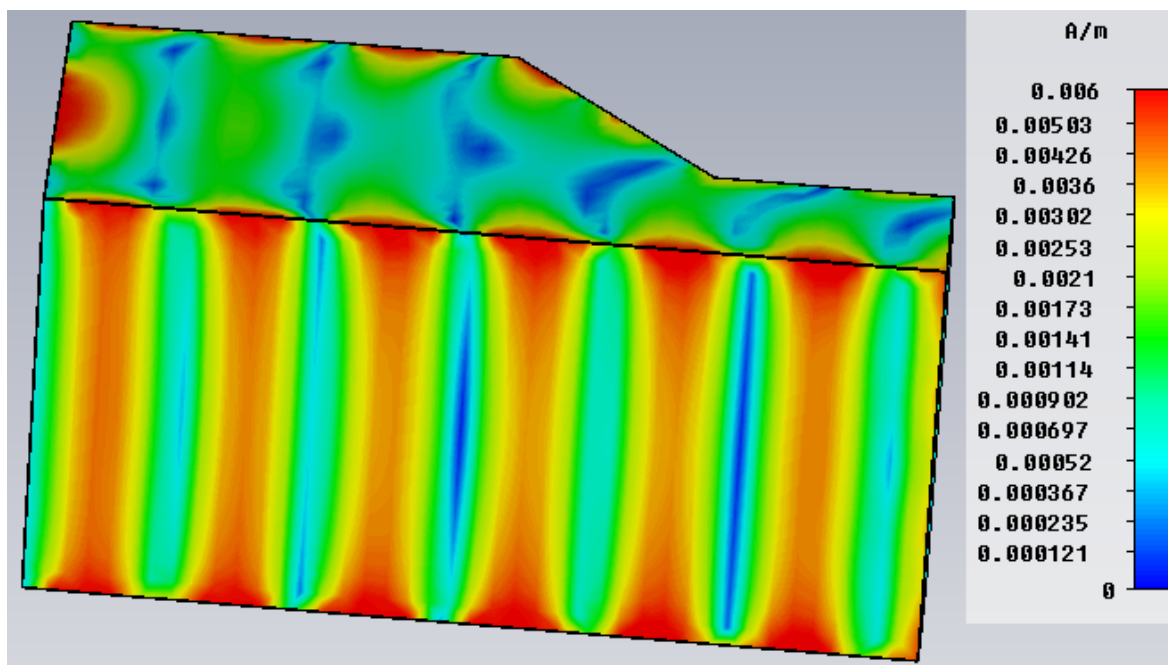


FIGURE A.1 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$ et $\phi=-90^\circ$) à 630MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

– Onde plane venant de l'avant

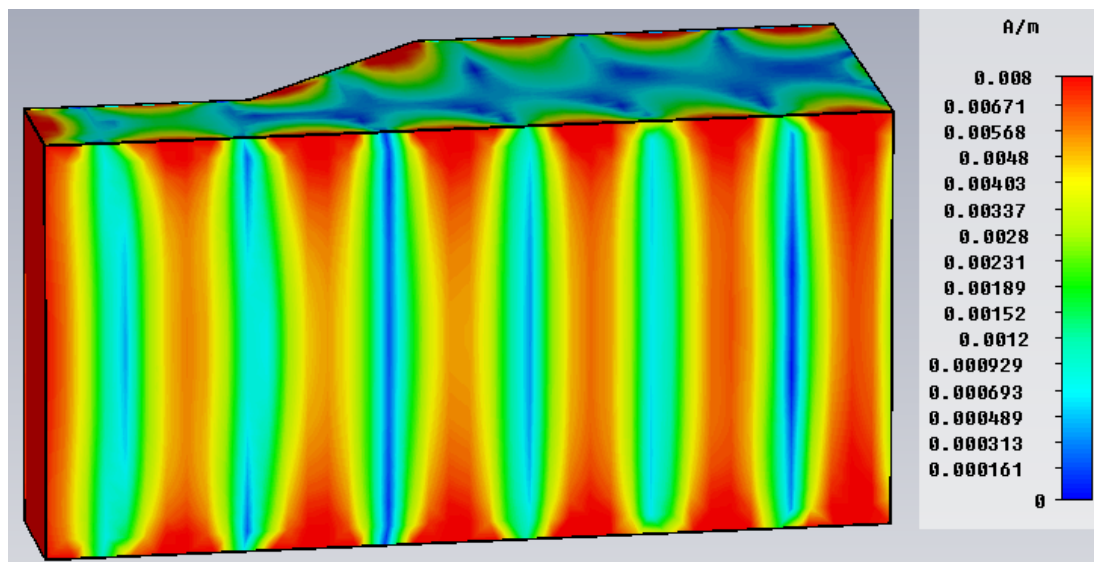


FIGURE A.2 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 630MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

– Onde plane venant de l'un des côtés

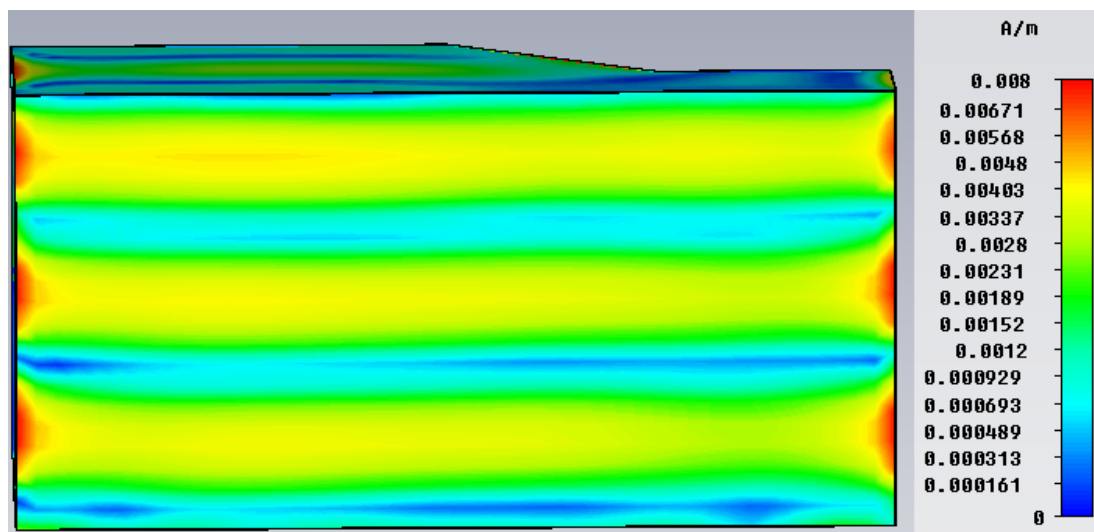


FIGURE A.3 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 630MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

A.2 Illumination du mini-car à 866MHz

– Onde plane venant de l'arrière

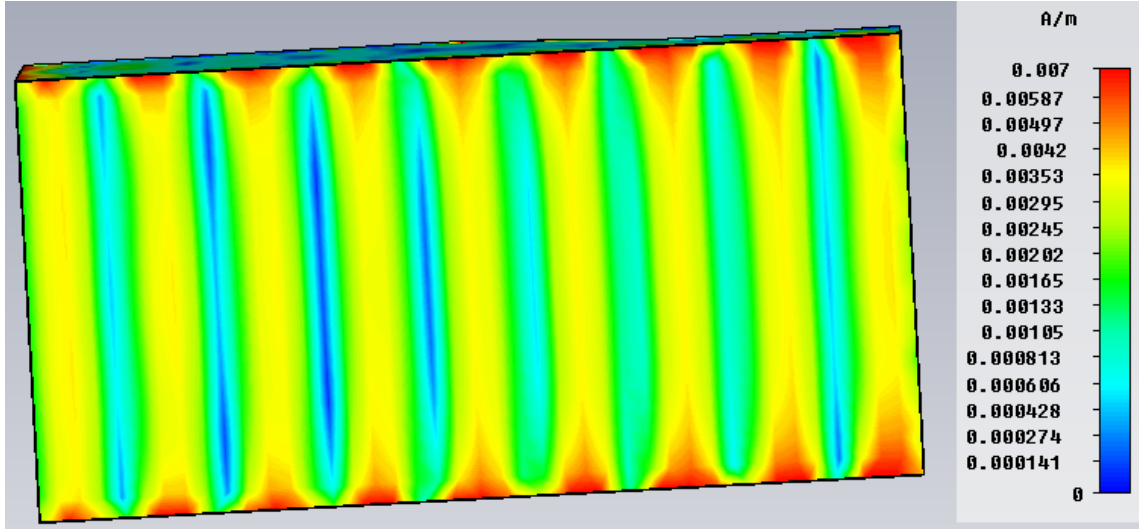


FIGURE A.4 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$ et $\phi=-90^\circ$) à 866MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

– Onde plane venant de l'avant

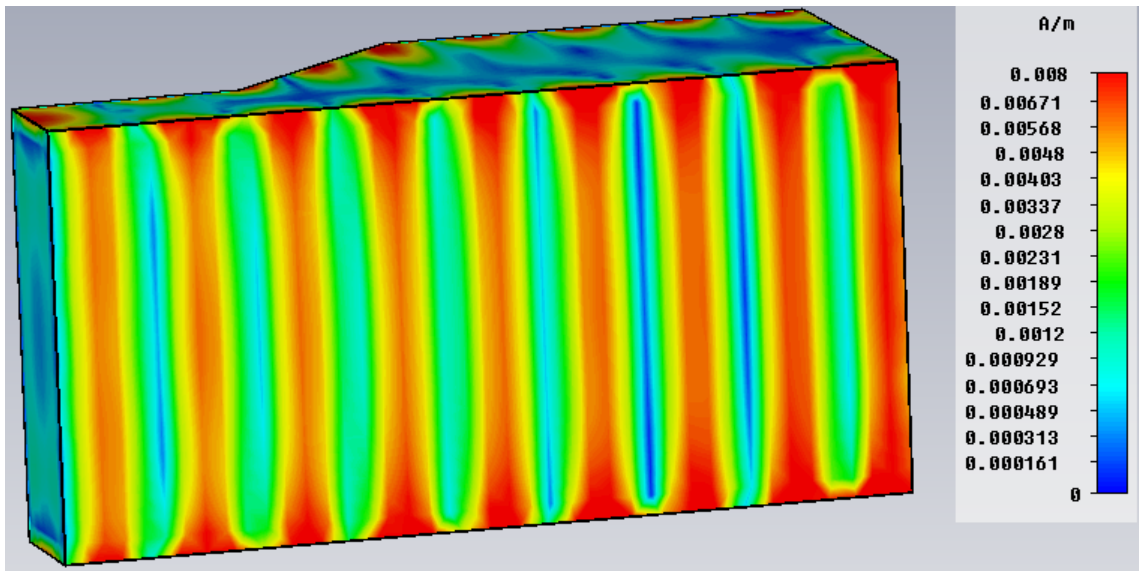


FIGURE A.5 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 866MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'un des côtés

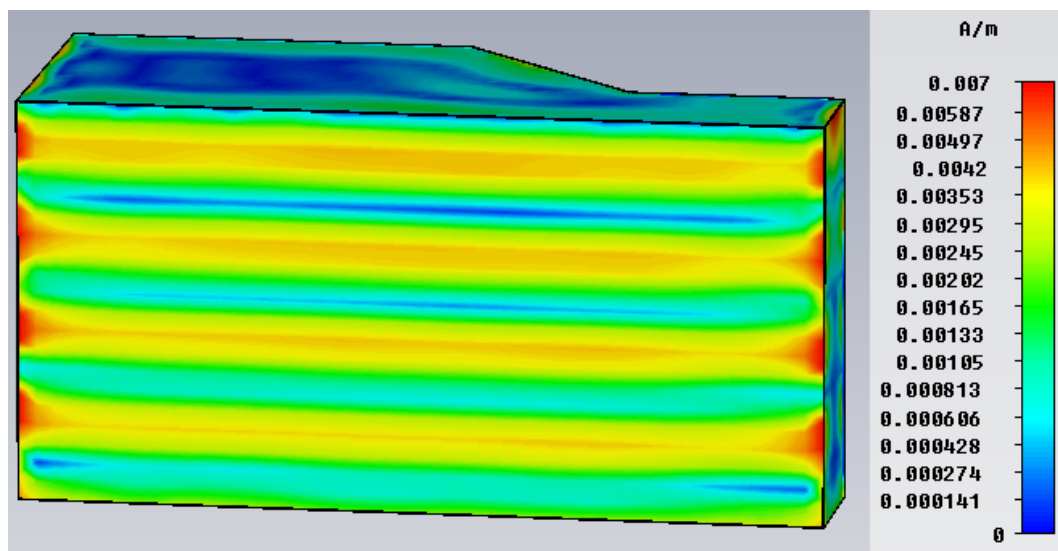


FIGURE A.6 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 866MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

A.3 Illumination du mini-car à 3.15GHz

- Onde plane venant de l'arrière

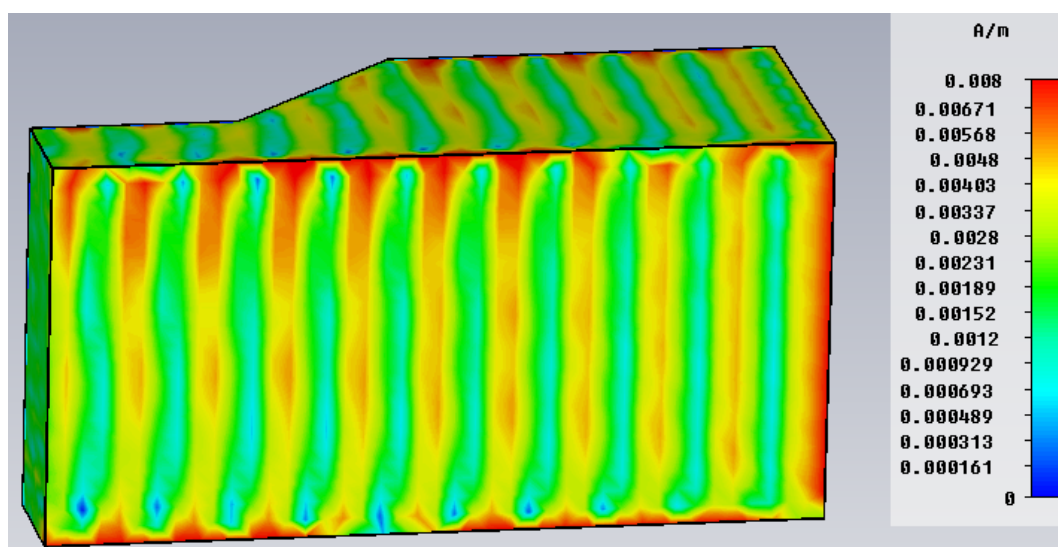


FIGURE A.7 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=90^\circ$ et $\phi=-90^\circ$) à 3150MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'avant

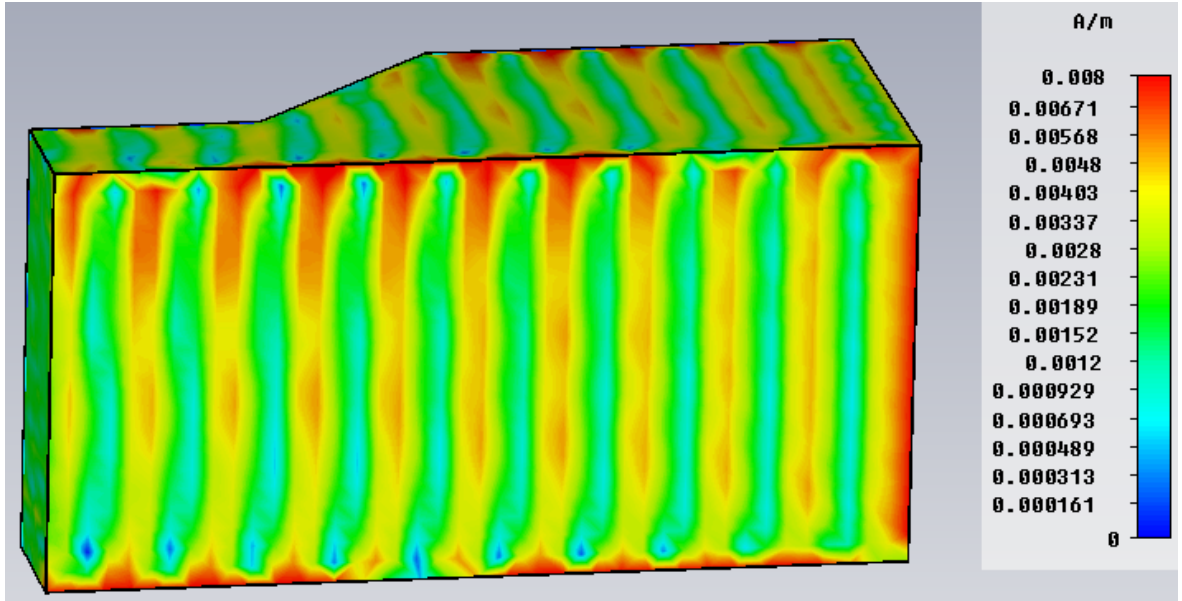


FIGURE A.8 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 3150MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'un des côtés

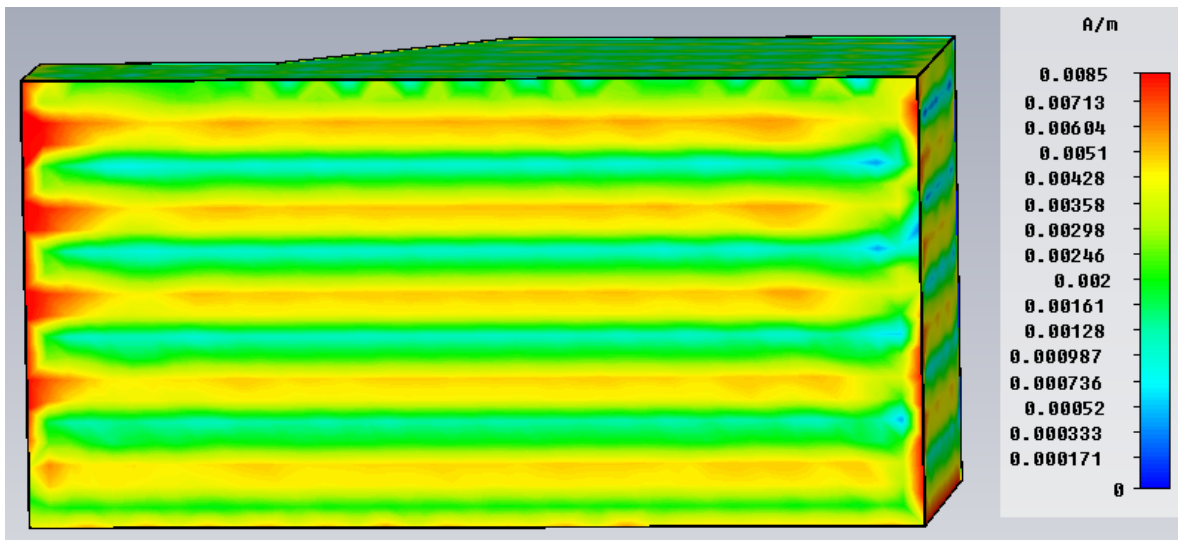


FIGURE A.9 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 3150MHz (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

Annexe B

Distribution des courants suite à une illumination du mini-car par une onde plane en présence d'un plan de sol réel

B.1 Illumination du mini-car à 630MHz

– Onde plane venant de l'arrière

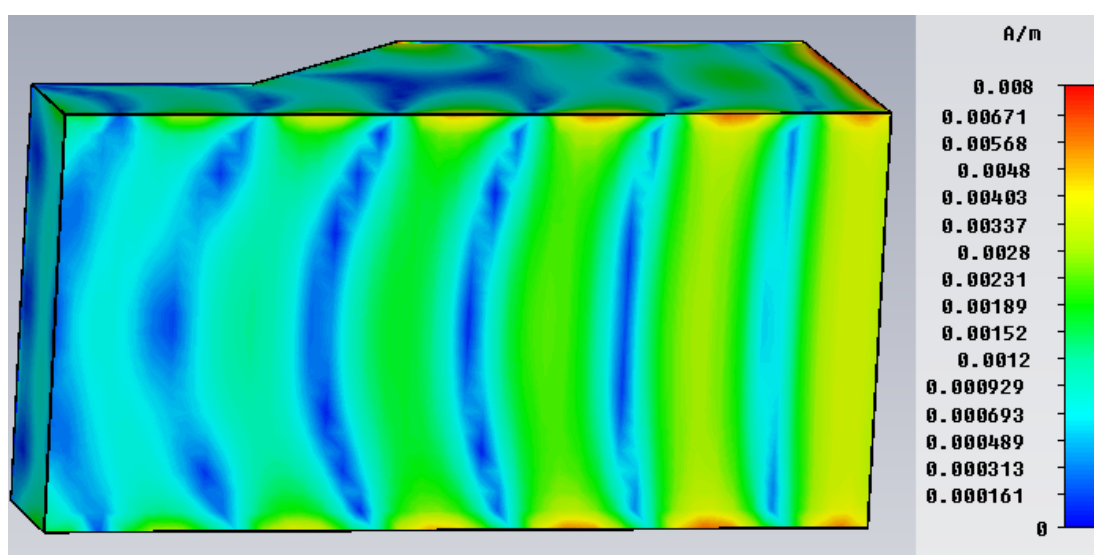


FIGURE B.1 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=-90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 630MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'avant

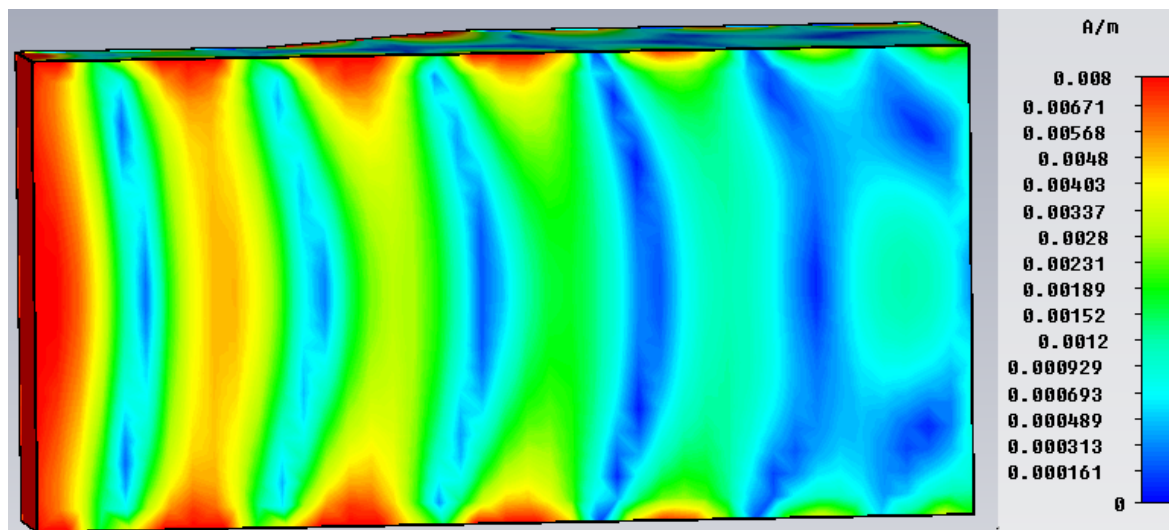


FIGURE B.2 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 630MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'un des côtés

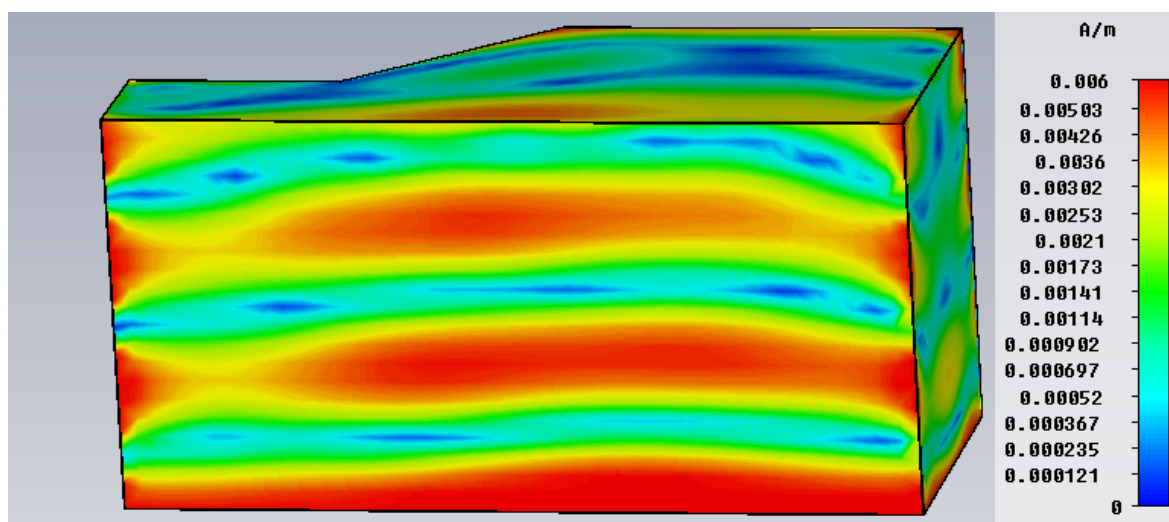


FIGURE B.3 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 630MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

B.2 Illumination du mini-car à 866MHz

– Onde plane venant de l'arrière

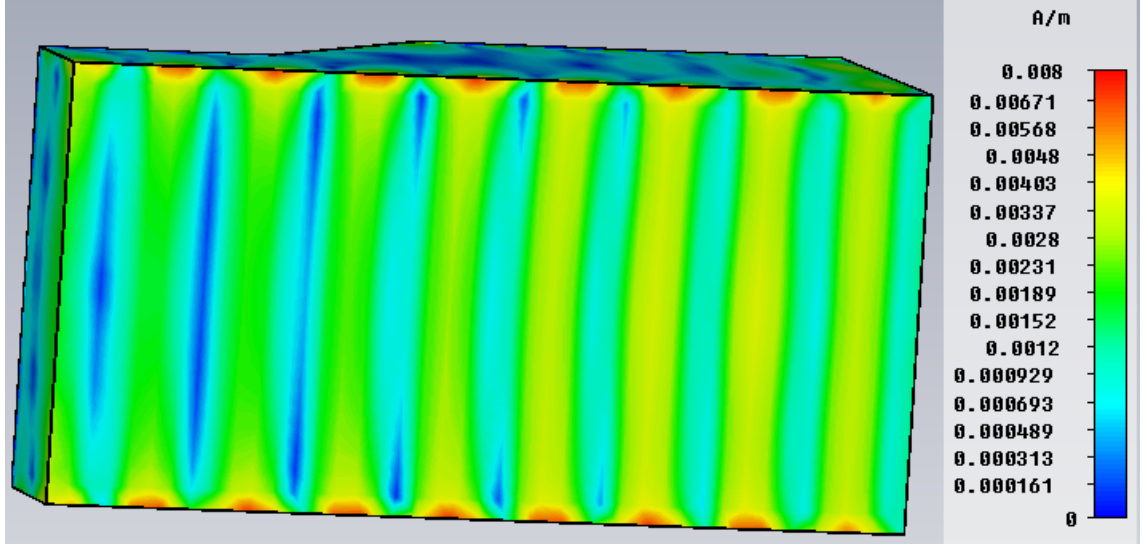


FIGURE B.4 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=-90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 866MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

– Onde plane venant de l'avant

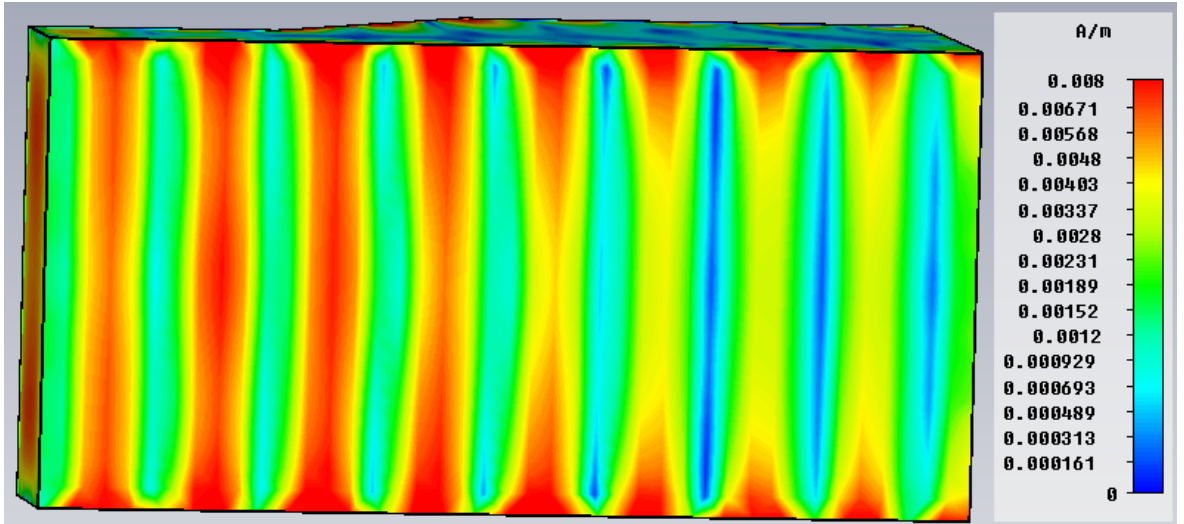


FIGURE B.5 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 866MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'un des côtés

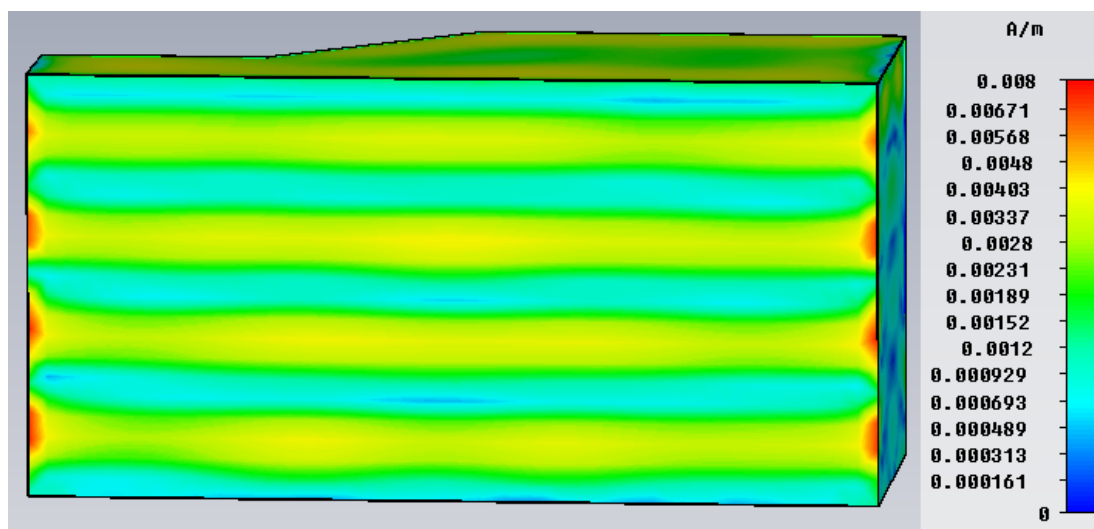


FIGURE B.6 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 866MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

B.3 Illumination du mini-car à 3.15GHz

- Onde plane venant de l'arrière

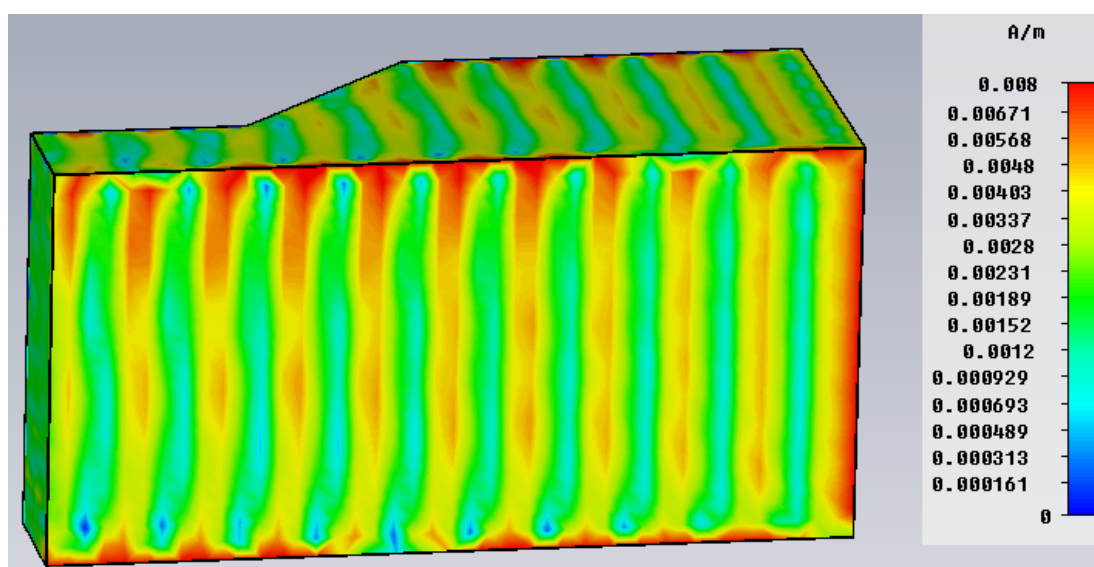


FIGURE B.7 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'arrière ($\theta=-90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 3150MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'avant

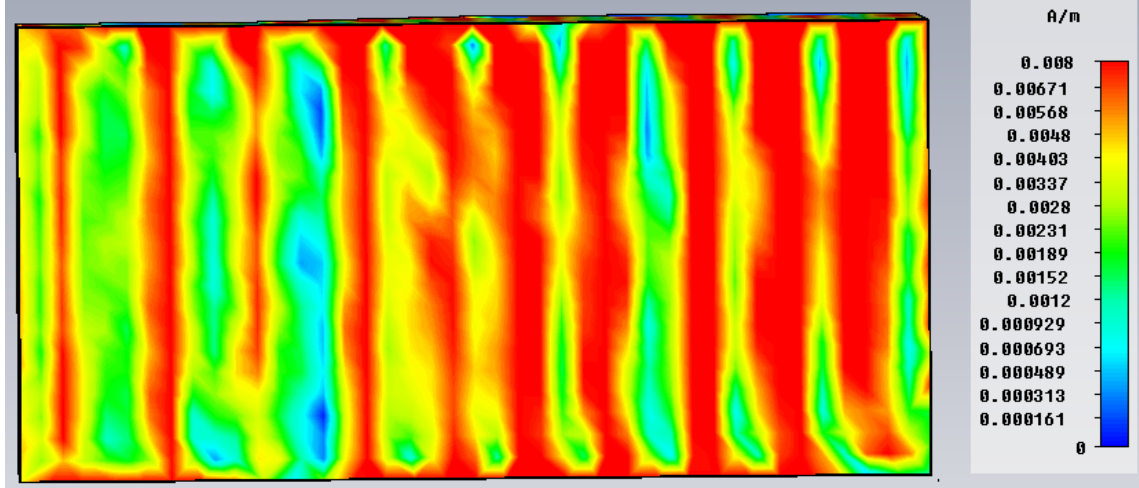


FIGURE B.8 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'avant ($\theta=90^\circ$ et $\phi=90^\circ$) à 3150MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

- Onde plane venant de l'un des côtés

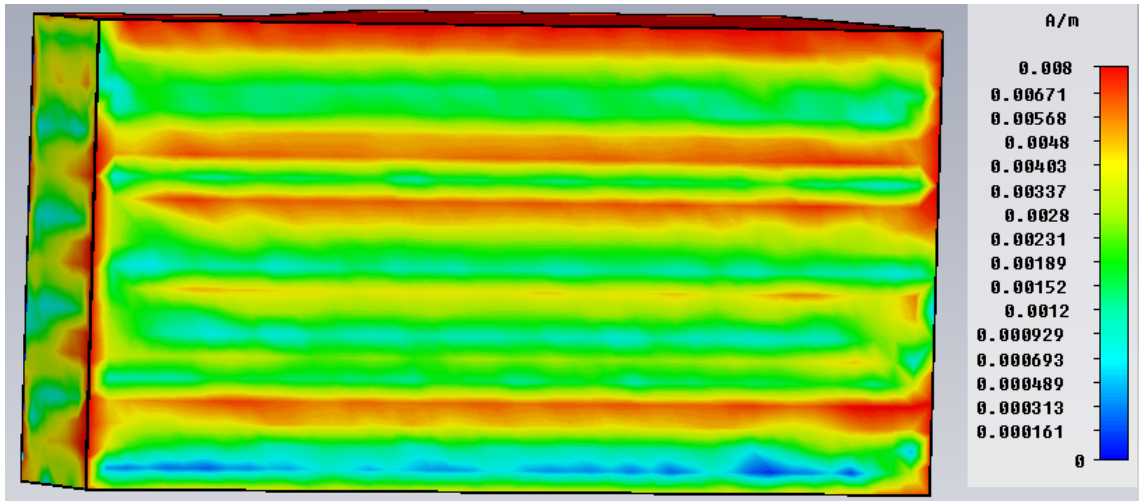


FIGURE B.9 – Cartographie des courants surfaciques sur le mini-car illuminé par une onde plane venant de l'un de ses côtés ($\theta=90^\circ$ et $\phi=0^\circ$) à 3150MHz avec prise en compte du plan de sol (vue de dessous ; ($\theta=180^\circ$ et $\phi=90^\circ$))

Annexe C

Distribution des courants suite à une illumination du mini-car par une onde plane en espace libre

C.1 Mesure du diagramme de rayonnement au point d'excitation P5



FIGURE C.1 – Photo du branchement du câble coaxial au niveau du phare avant gauche

La figure C.2 montre les diagrammes obtenus pour les 3 plans de coupe lorsqu'un branchement au point $P5$ est effectué. Ces diagrammes sont obtenus à 87MHz, 100MHz et à 107MHz.

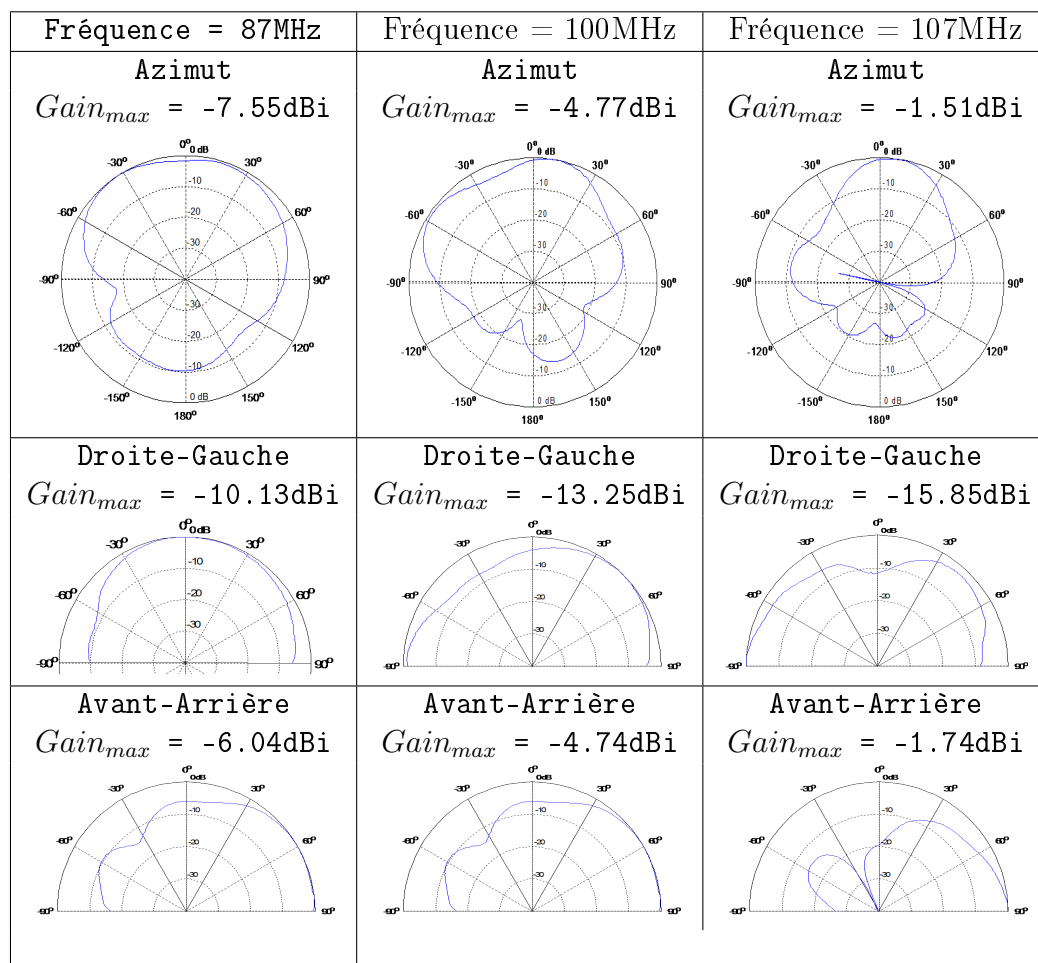


FIGURE C.2 – Diagrammes de rayonnement normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P5$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz

C.2 Mesure du diagramme de rayonnement au point d'excitation P6



FIGURE C.3 – Photo du branchement du câble coaxial au niveau du coffre arrière gauche

La figure C.4 montre les diagrammes obtenus pour les 3 plans de coupe lorsqu'un branchement au point $P6$ est effectué. Ces diagrammes sont obtenus à 87MHz, 100MHz et à 107MHz.

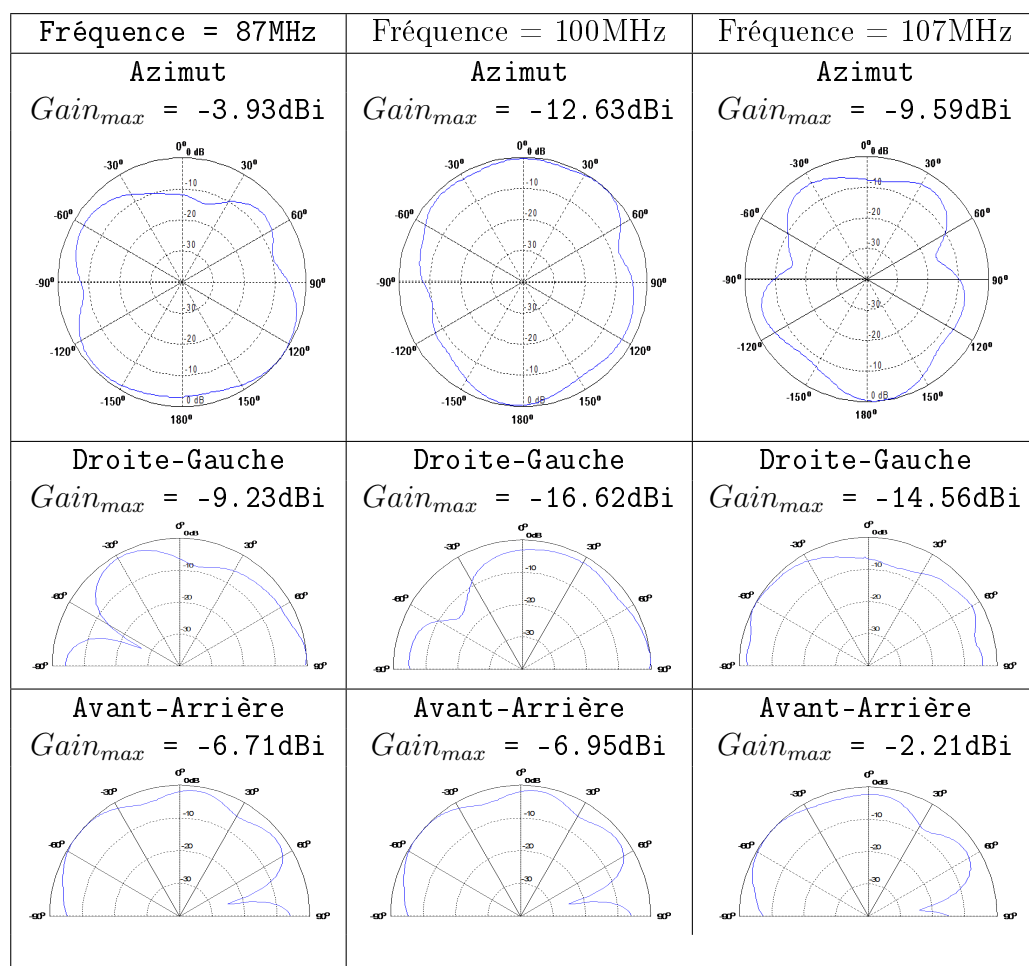


FIGURE C.4 – Diagrammes de rayonnement normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P6$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz

C.3 Mesure du diagramme de rayonnement au point d'excitation P7



FIGURE C.5 – Photo du branchement du câble coaxial derrière la console auto-radio

La figure C.6 montre les diagrammes obtenus pour les 3 plans de coupe lorsqu'un branchement au point $P7$ est effectué. Ces diagrammes sont obtenus à 87MHz, 100MHz et à 107MHz.

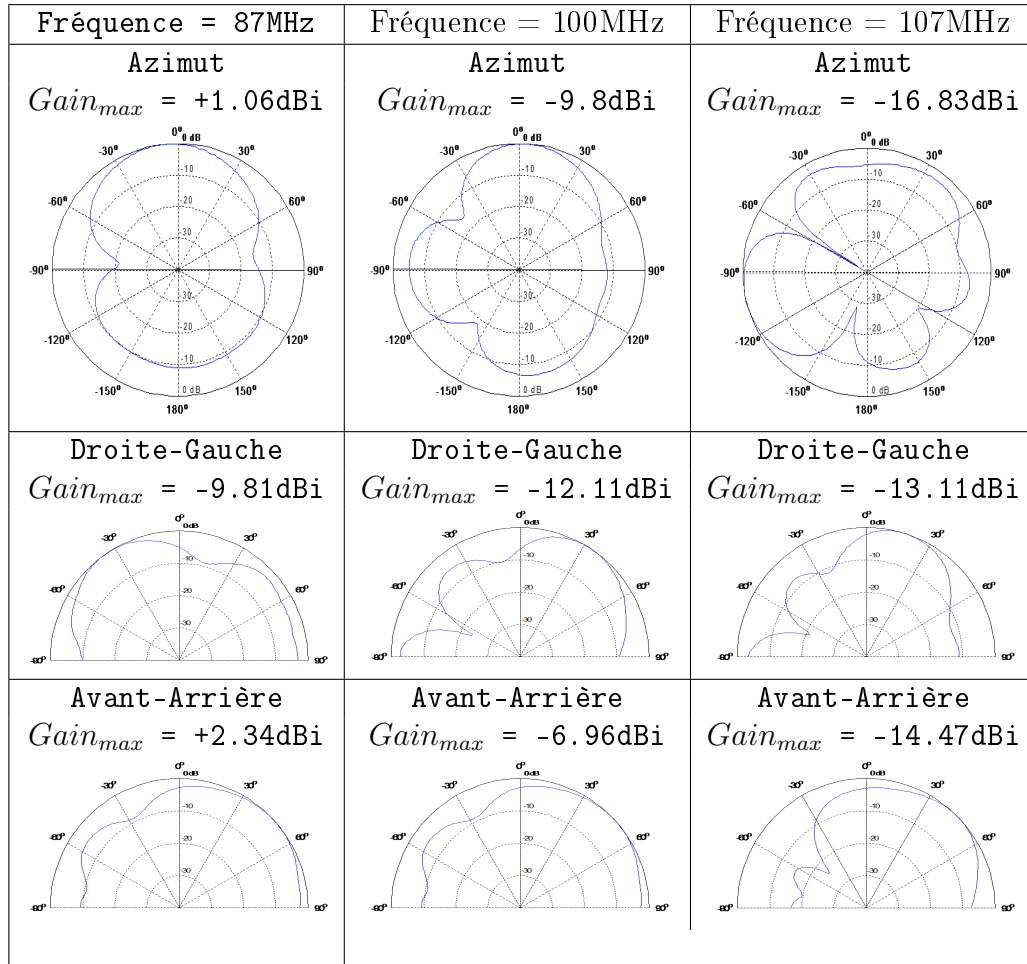


FIGURE C.6 – Diagrammes de rayonnement normalisés et gains maximaux pour les trois plans mesurés avec le point d'accès $P7$ à 87MHz à 100MHz et 107MHz

Bibliographie

- [1] Stefan Lindenmeier and Joachim Brose. *Time Domain Methods in Electromagnetics, chap. Numerical Modeling of Car Antennas*, volume 121 Pages 303-319. 2008.
- [2] J.J.H. Wang. Conformal multifunction antenna for automobiles. *Wang Electro-Opto Corporation*.
- [3] J.J.H. Wang. Conformal multifunction antenna for automobiles application. *1994 URSI Radio Science Meeting, Seattle, Washington*, pages 224, June 1994.
- [4] Timothy J. Talty, Dr. Yingcheng Dai, and Leo Lanctot. Automotive antennas trends and future requirements. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1 pages 430-433, July 2001.
- [5] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory : Analysis and Design, Second Edition*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [6] Harrison C. Jr. Monopole with inductive loading. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 11 pages 394-400, 1963.
- [7] Young-Pyo Hong, Yong-Sik Shin, Cheol Mun, Yongshik Lee, and Jong-Gwan Yook. Multi-functional vehicle antenna system for FM and PCS services. *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, Honolulu, HI, USA*, pages 1092-1095, 2007.
- [8] Harada Takuji and Kido Takashi. Automobile loop antenna. *United States Patent Applications Publications US 6,958,729B1*, Aug.15 1995.
- [9] Benoit B. Mandelbrot. *Les objets fractals : forme, hasard et dimension*. Flammarion, Paris, 1975.
- [10] Carles Puente. *Fractal antennas*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 1997.
- [11] Vijayen Veerasamy. Glass antenna for vehicle. *United States Patent Application Publication*, US 6,552,690 B2, Apr. 22 2003.
- [12] Jin-Ho KIM and Dong-Won Lee. Glass antenna for vehicle. *United States Patent Application Publication*, US 2009/0174616 A1, Jul. 09 2009.
- [13] Yoshihisa Shibata and Hiroshi Mizuno. Planar antenna for vehicle. *United States Patent Application Publication*, US 4,887,089, Dec. 12 1989.

- [14] Hyung Suk Lee, Jeong-Geun Kim, Songcheol Hong, and Jun-Bo Yoon. Micro-machined CPW-Fed Suspended Patch Antenna for 77GHz Automotive Radar Applications. *35th European Microwave Conference, Paris, France*, Vol.3 :4, Oct. 4-6 2005.
- [15] N. Koch. Triple-service gps-dab/dmb-wimax patch antenna for automotive applications. *Antennas and Propagation Conference, 2009. LAPC 2009. Loughborough, UK*, pages 605–608, Nov. 16-17 2009.
- [16] Louis L. Nagy, Warren Mich, Franck T. C. shum, and Jimmy L Funke. Trasparent film antenna for a vehicle window. *United States Patent Application Publication*, US 5,083,135, Jan.21 1992.
- [17] L. Low, R. Langley, and J. Batchelor. Modelling and performance of conformaall automotive antennas. *IET Microw. Antennas and Propagation*, 1 pages 973-979, Jan. 2007.
- [18] Louis Leonard Nagy. Am defogger grounding system for vehicle window antennas. *United States Patent Application Publication*, US 6,147,654, Nov. 14 2000.
- [19] akihiro Noguchi, Hiroyuki Fujii, and Kanya Hirabayashi. Glass antenna for vehicle. *United States Patent Application Publication*, US 7,091,914 B2, Aug. 15 2006.
- [20] J. Reiter L Lindenmeier, H. Hopf. Active am-fm windshield antenna with equivalent performance to the whip now as standard equipment in car production. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Volume 23, pp621-624, June. 1985.
- [21] Yong Shik SHIN. Glass antenna for vehicle. *United States Patent Application Publication*, US2009/0021435 A1, Jan 2009.
- [22] Hidetoshi Oka. Glass window antenna system for motor vehicles. *United States Patent Application Publication*, US 6,215,450 B1, April 2001.
- [23] Suezi Kawaguchi, Kozo Miura, Shigenobu Esaki, and Takahiro Hirase. Windshield antenna for automobile. *United States Patent Application Publication*, US 3,771,159, Nov. 06 1973.
- [24] David Frederick Jordan. Method of rf grounded mounted antenna to automotive metal frames. *United States Patent Application Publication*, US 6,768,467, July 27 2004.
- [25] Hiroshi Inaba, Masao Shinnai, Kazuya Nishikawa, Tamotsu Saitoh, and Tokio Tsukada. Vehicle window glass antenna using transparent conductive film. *United States Patent Application Publication*, US 4,849,766, July 18 1989.
- [26] Louis L Nagy, Mark bellinger, and Douglas C. Martin. Transparent vehicle window antenna. *United States Patent Application Publication*, US 5,528,314, June 18 1996.
- [27] Sakurai Kaoru, Murakami Harunori, Torii Toshio, and Oka Hidetoshi. Vehicle receiving apparatus using a window antenna. *United States Patent Application Publication*, US 4,864,316, Sept. 5 1989.

- [28] Yoshinobu Tsurume. Glass antenna for vehicle. *United States Patent Application Publication*, US 2009/0058742 A1, March 05 2009.
- [29] Hyok J. Song, Tsung Yuan Hsu, Daniel F. Sievenpiper, Timothy J. Talty, and Hui-Pin Hsu. Method for improving the efficiency of transparent thin film antennas and antennas made by such method. *United States Patent Application Publication*, US 4,427,961 B2, Sept. 23 2008.
- [30] Richard E. Fusinski. Vehicle antenna system. *United States Patent Application Publication*, US 5,959,581, Sept. 28 1999.
- [31] Andrew Adrien. In-glass antenna element matching. *United States Patent Application Publication*, US 6,417,811 B1, July 09 2002.
- [32] Andrew Adrien, Bruce R. Jones, and Robert A. Schuessler. Motor vehicle antenna system. *United States Patent Application Publication*, US 5,610,618, March 11 1997.
- [33] Yung Tao Liu, Saou-Wen Su, Chia-Luan Tang, Shyh-Tirng Fang, and Kin-Lu Wong. On vehicle low-profile metal-plate antenna for 900MHz operation. *Microwave and optical technology letters*, Vol.40 No. 1 pages 79-80, Jan. 05 2004.
- [34] Yung Tao Liu, Saou-Wen Su, Chia-Luan Tang, Hong-Twu Chen, and Kin-Lu Wong. On vehicle low-profile metal-plate antenna for AMPS/GSM/PCS/UMTS multiband operation. *Microwave and optical technology letters*, Vol.41 No. 2 Pages 144-146, Apr. 20 2004.
- [35] P. Le Thuc, R. Staraj, and G. Kossiavas. Antenne miniature multi-norme GSM/DCS/PCS/UMTS. *Laboratoire d'Electronique, Antennes et Télécommunications Université de Nice-Sophia Antipolis/UMR-CNRS 6071*.
- [36] P. Le Thuc, R. Staraj, and G. Kossiavas. Antenne miniature quadribande GSM/DCS/PCS/UMTS. *Laboratoire d'Electronique, Antennes et Télécommunications Université de Nice-Sophia Antipolis/UMR-CNRS 6071*.
- [37] Daginnus M., Kronberger R., and Stephan A. Ground plane affect on the performance of SDARS antenna. *Antennas and Propagation Society Symposium, IEEE*, Vol. 4 pages 748-751, Jan. 21 2002.
- [38] Kronberger R., Hassmann G.-H., and Schulz S. Measurement and analysis of vehicle influences on the radiation pattern os sdars-antennas. *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE*, Issue 4, 2002 pages 740 - 743, Sept. 2002.
- [39] Kronberger R., Lindenmeier H.K., Hopf J.F., and Reiter L.M. Design method for antenna arrays on cars with electrically shortelements under incorporation of the radiation properties of the car body. *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. IEEE*, Vol. 1, pages 418 - 421, July 1997.
- [40] Kronberger R., Lindenmeier H., Reiter L., and Hopf J. Adaptive low profile array antennas for smart car antenna systems. *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd*, Vol. 1 pages 63-67, June-Sept 2001.

- [41] F. Ares, G. Franceschetti, J. Mosig, S. Vaccaro, J. Vassal'lo, and E. Moreno. Satellite communication with moving vehicle on earth : two prototype circular array antennas. *IEEE trans on antennas and propagation*, Vol. 39 issue 1, Oct. 05 2003.
- [42] M. Vicente-Lozano, G. Franceschetti, F. Ares-Pena, and E. Moreno. Analysis and synthesis of a printed array for satellite communications with moving vehicle. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 50 issue 11, Nov. 2002.
- [43] M.G.H. Bell. Policy issues for the future intelligent road transport infrastructure. *Intelligent Transport Systems, IEEE Proceedings*, Vol. 153 issue 2 pages 147-155, July 2006.
- [44] Reichardt D., Miglietta M., Moretti L., Morsink P., and Schulz W. Cartalk 2000 : safe and confortable driving based upon inter-vehicle-communication. *Intelligent Vehicle Symposium, IEEE Proceedings, Versailles, France*, pages 545-550, June 17-21 2002.
- [45] W. Enkelmann Fleetnet. Applications for inter-vehicle communication. *Intelligent Vehicle Symposium, IEEE Proceedings, Columbus, OH, USA*, pages 162-167, July 23 2003.
- [46] R. Ramanathan. On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas. *2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing , Long Beach, California, USA*, Pages 95-105, Oct. 2001.
- [47] Abrey T. and White P. A comparison of switched pattern diversity antenna. *Vehicular Technology Conference, Secaucus, NJ, USA*, Pages 89-92, May 18-20 1993.
- [48] Lars Reichardt, Thomas Fügen, and Thomas Zwick. Influence of antennas placement on car to car communications channel. *European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany*, 3rd edition, March 23-27 2009.
- [49] Anand Prabhu Subramanian, Vishnu Navda, Pralhad Deshpande, and Samir R. Das. A measurement study of inter-vehicular communication usign steerable beam directional antenna. *Computer Science Department, Stony Brook University, Stony Brook, NY 11794, USA*.
- [50] Ibambe Gatsinzi M., Bunlon X., Jouvie F., Letertre T., and Azoulay A. Inter-vehicle communications : Study of the integration of a 5.8GHz antenna and a radio link in the 5GHz band. *Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA*, pages 1-4, July 5-11 2008.
- [51] Ibambe Gatsinzi M., Jouvie F., Bunlon X., and Azoulay A. Study of a 5.8GHz frequency band patch antenna integrated into a vehicle for automotive dsrc applications. *International Conference on Electromagntics in Advanced Applications*, pp. 543-546, Sept. 17-21 2007.
- [52] M. T. Ali, T. A. Rahman, M. R. Kamarudin, and M. Tan. Reconfigurable linear array antenna with beam shaping at 5.8GHz. *APMC Asia-Pacific, Microwave Conference*, pages 1-4, Dec. 16-20 2008.

- [53] Mathieu Caillet. *Etude et Conception d'un Système Radar Courte Portée et d'Antennes Reconfigurables en Bande Millimétrique*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2006.
- [54] Metz Carsten, Lissel Ernst, and Jacob Arne F. Planar multiresolutional antenna for automotive radar. *31st European Microwave Conference, London, England (2001)*, Pages 1-4, March 26 2007.
- [55] Schoenlinner Bernhard, Ebling James P., Kempel Leo C., and Rebeiz Gabriel M. Compact multibeam dual-frequency (24 and 77GHz) imaging antenna for automotive radars. *33rd European Microwave Conference, Munich, Germany (2003)*, pages 785-788, April 02 2007.
- [56] Michael Wiedmann, Markus Pfletschinger, and Dirk Wendt. Antenna for a central locking system of an automotive vehicle. *United States Patent Application Publication*, US 6,937,197 B2, Aug. 30 2005.
- [57] Eberhard Gschwendtner. Breitbandige multifunktions-antennen für den konformen einbau in kraftfahrzeug. *These Universität Karlsruhe*.
- [58] R.G. Corzine and J.A. Mosko. Four-arm spiral antenna. *Norwood MA : Artech House*.
- [59] D.S. Filipovic and J.L. Volakis. Multifonctionnal conformal antennas for automobile applications. *URSI ,Maastricht*, Aug. 17-24 2002.
- [60] C. Caloz and T. Itoh. *Electromagnetic metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Applications*. John Wiley And Sons Ltd, 2005.
- [61] G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain. *Negative-Refractive Metamaterials : Fundamental Principles and Applications*. John Wiley And Sons Ltd, 2005.
- [62] J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, Vol. 85 No 18 Pages 3966-3969, Oct. 30 2000.
- [63] Metz Carsten. Phased array metamaterial antenna system. *United States Patent Applications Publications*, US 2005/0225492 A1, Oct. 13 2005.
- [64] Shinoda H.and Kondoh H. Composite patch array antenna with built-in polarizer for reducing road clutter noises of 76GHz automotive Radars. *Microwave Symposium, 2007. IEEE/MTT-S International,Honolulu, HI*, pages 405-408, June 3-8 2007.
- [65] Chu T and Semplak R. A note on painted reflecting surfaces. *IEEE, Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 24, pages 99-101, Jan 1976.
- [66] Otoshi T.Y., Rahmat-Samii Y., Cirillo R. Jr., and Sosnowski J. Noise temperature and gain loss due to paints and primers : a casestudy of dsn antennas. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, Vol. 43, No 3, pages 11-28, June 2001.
- [67] Hombach V. and Kuhn E. Experimental study of the effect of paint on embedded automotive antennas. *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, Vol. 37 pages 1093-1101, Sept. 1989.

- [68] Pell B., Rowe W., Sulic E., Ghorbani K., John S., Gupta R., Kefei Z., and Hughes B. Complete dual-offset reflector antenna analysis including near-field, paint-layer and cfrp-structure effects. *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, Vol. 11-14 May 2008 pages 3057-3061, Sept. 1989.
- [69] Georges G. Chadwick. Antenna. *United States Patent Application Publication*, US2005/0195117A1, Sep.8 2005.
- [70] Yoshihiro Hagiwara. Method and apparatus for improving antenna efficiency. *United States Patent Application Publication*, US6.956.534B2, Oct.18 2005.
- [71] Williams Fred B. and Hill Fred P. Vehicle body antenna. *Canadian Intellectual Property Office*, CA487464, Oct.21 1952.
- [72] Jack W. Sheriff. Multi-frequency vehicular antenna system. *United States Patent Application Publication*, US4,751,514, June.14 1988.
- [73] Walter W. Schweiss and Raymond I. Gratzner. Vehicular antenna system. *United States Patent Applications Publications*, US 2,575,471, Nov. 20 1951.
- [74] Kurt Ikrath, William Kennebeck, and Edward C. Shaffer. Camouflage VHF antenna. *United States Patent Applications Publications*, US 4,023,179, May 10 1977.
- [75] Eric K. Walton, Harry S. Koontz, and Raymond D. Moran. Transparent window antenna. *United States Patent Applications Publications*, US 5,355,144, Oct. 11 1994.
- [76] Ryokichi Doi and Hiroshi Iijima. Glass antenna and glass antenna system for vehicles. *United States Patent Applications Publications*, US 7,071,886 B2, Jul. 04 2006.
- [77] Yu-Ching Hsu, Ken-Huang Lin, and Yu-Ching Huang. A scale-sized model for analysis of vehicle antennas. *IEEE, Antennas and Propagation Society Symposium, Honolulu, HI, 2007*, pages 521,524, June 9-15 2007.
- [78] NIAN Demba, GIMET Eric, COLOMBEL Franck, and HIMDI Mohamed. Dispositif de couplage d'un émetteur et/ou récepteur d'ondes électromagnétiques couplé à une structure métallique utilisée en tant qu'antenne. *Brevet FR 0953927*.
- [79] NIAN Demba, GIMET Eric, COLOMBEL Franck, and HIMDI Mohamed. Système émetteur et/ou récepteur d'ondes électromagnétiques couplé à une structure métallique utilisée en tant qu'antenne multi-diagramme. *Brevet FR 0957915*.

